

Wasserstatusüberwachung an Nutzpflanzen mittels THz-Spektroskopie

DISSERTATION

zur

Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaften
(Dr. rer. nat)

dem

Fachbereich Physik
der Philipps-Universität Marburg



vorgelegt von

RALF GENTE

aus

Marburg

Marburg an der Lahn, 2016

Vom Fachbereich Physik der Philipps-Universität Marburg
als Dissertation angenommen am: 03.11.2016

Erstgutachter: Prof. Dr. Martin Koch
Zweitgutachter: Prof. Dr. Dirk Selmar

Tag der mündlichen Prüfung: 11.11.2016
Hochschulkennziffer: 1180

Die Erde ist ein Irrenhaus. Dabei könnte das bis heute erreichte Wissen der Menschheit aus ihr ein Paradies machen.

Joseph Weizenbaum^a

^aIm Artikel „Wir gegen die Gier“ in der Süddeutschen Zeitung vom 8.1.2008

Vorwort

In den vergangenen Jahren, die ich als Doktorand am Fachbereich Physik der Philipps-Universität Marburg verbracht habe, haben mich verschiedene Menschen für ein kürzeres oder längeres Stück auf meinem Weg begleitet, von denen ich lernen durfte, die mir mit Rat und Tat weitergeholfen haben, oder die mich auf andere Art und Weise unterstützt haben, wofür ich mich herzlich bedanken möchte. Der Versuch, alle diese Menschen namentlich zu nennen, beinhaltet das Risiko, versehentlich jemanden auszulassen, der es eigentlich besonders verdient hätte, hier genannt zu werden. Ich will diesen Versuch dennoch unternehmen und hoffe, dass mir dabei kein all zu großer Fehler unterläuft¹. Eine wichtige Position in dieser Liste nimmt als Betreuer dieser Dissertation Prof. Martin Koch ein, der sich gleichzeitig darauf verstand, einerseits meine Aktivitäten in eine erfolgversprechende Richtung zu lenken und mir andererseits große Freiheit bei der Entwicklung von eigenen Fragestellungen und Lösungsansätzen zu lassen. Das Miteinander unter den Doktorandinnen und Doktoranden und den Studierenden der AG Koch habe ich immer als von gegenseitiger Wertschätzung und Unterstützung geprägt erlebt. Im direkten Zusammenhang mit meiner Arbeit an der Wasserstatusuntersuchung an Pflanzen ist Norman Born zu nennen, der sich ebenfalls mit Fragestellungen auf diesem Gebiet beschäftigte und so immer ein kompetenter und hilfsbereiter Diskussionspartner war. Für ihren tatkräftigen Einsatz im Labor bei den Messungen an Rübensaatgut und den Sub-THz-Messungen möchte ich Eva-Maria Stübling und Arno Rehn danken. Nicht weniger wichtig waren aber auch alle kleineren und größeren Hilfen und Ratschläge, die mir andere Mitglieder der Arbeitsgruppe gaben: Ajanth Velauthapillai, Amin Soltani, Christian Jansen, Christian Lammers, Christoph Möller, David Jahn, Jan Ornik, Kristian Altmann, Maik Scheller, Marco Reuter, Marina Gerhard, Markus Stein, Matthias Stecher, Maximilian Schneider, Maximilian Vaupel, Michael Drexler, Michael Schwerdtfeger, Nino Voß, Ole Peters, Sina Lippert, Stefan Busch, Stefan Sommer, Steffen Schumann und Thorsten Probst. Auch die Post-Doktoranden der AG Koch Jan Balzer, Gunter Urbasch, Bernd Fischer und Arash Rahimi-Iman sollen hier nicht unerwähnt bleiben. In verwaltungstechnischen Fragen konnte ich auf den Rat und die Unterstützung der Sekretärinnen der AG Koch Maya Strobel und Anne Ehlers zählen. Viele mechanische Aufbauten wären ohne Rüdiger Rink, Hermann Günther, Rainer Täubner und ihr Team in der Feinmechanischen Werkstatt des Fachbereichs nicht möglich gewesen. Bei der Umsetzung von eigenen elektronischen Neuentwicklungen und durch die spontane Reparatur von Laborgeräten haben Carsten Schindler und Ralf Nieländer aus dem Elektroniklabor mir mehrmals an Stellen weitergeholfen, an denen ich alleine ratlos gewesen wäre. Durch meine Mitarbeit in einem Projekt, das in Kooperation mit dem Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcen-

¹ Jede/n, die/der hier seinen Namen ungerechterweise nicht findet, bitte ich, mich ganz unverblümt darauf anzusprechen, damit ich sie/ihn zur Kompensation zu einem Getränk ihrer/seiner Wahl einladen kann.

schutz der Universität Bonn stattfand, konnte ich dort mit Prof. Jens Léon, Wiebke Sannemann, Merle Noschinski und Agim Ballvora viele biologische und methodische Fragen diskutieren. Durch die Kooperation mit der AG Naturschutzbiologie von Prof. Birgit Ziegenhagen am Fachbereich Biologie der Uni Marburg kam es zu zahlreichen interessanten Diskussionen mit David Behringer und Sascha Liepelt. In zahlreichen Diskussionen und bei der Arbeit an gemeinsamen Veröffentlichungen habe ich wichtige Denkanstöße von Enrique Castro-Camus vom Centro de Investigaciones en Optica in León, Mexico, erhalten. Für die Hilfe bei der Anzucht von Sojapflanzen möchte ich mich beim Leiter des Botanischen Gartens der Uni Marburg Andreas Titze und bei Christina Rees und Karin Schmidt bedanken. Für die Ermöglichung der Photosynthesemessungen an Sojapflanzen danke ich Prof. Jörg Fromm und Jasmin Vuralhan vom Zentrum Holzwirtschaft der Universität Hamburg. Mein Dank für das Korrekturlesen so mancher englischsprachiger Texte geht an meine Freunde Magdalena Bornmann und Maximilian Ernst.

Ein besonderer Dank gilt der Johannes Hübner Stiftung Gießen, welche mich in der zweiten Hälfte meiner Zeit als Doktorand mit einem Stipendium unterstützte.

Dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt danke ich für die Möglichkeit als externer Teilnehmer seines Graduiertenprogramms an zahlreiche interessanten Fortbildung- und Seminar-Veranstaltungen teilnehmen zu können.

Auch wenn die Nennung einzelner Namen an dieser Stelle zu weit führen würde, möchte ich hier auch alle jene erwähnen, die mir auch abseits der wissenschaftlichen Arbeit die Gelegenheit dazu gaben, dass ich während meiner Zeit als Doktorand viel lernen, neue Erfahrungen sammeln und schöne Momente erleben konnte. Als Beispiele seien hier nur die Fahrten der AG Koch nach Elba, die Aktivitäten von und mit Weitblick Marburg e.V. und dem Club der Ehemaligen der deutschen Schülerakademien, zahlreiche Ausflüge zu Tango-Argentino-Tanzabenden und die Teilnahme an verschiedenen Kursen zum Erlernen desselben genannt.

Den wichtigsten Punkt habe ich mir für das Ende dieser Danksagung aufgehoben: Für ihre uneingeschränkte Unterstützung nicht nur während der Arbeit an dieser Dissertation möchte ich mich bei meinen Eltern Irmgard und Michael Gente und bei meiner Schwester Regina bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	9
2. Grundlagen	13
2.1. Pflanzenphysiologische Grundlagen	13
2.1.1. Wasserpotenzial	13
2.1.2. Wassertransport	15
2.1.3. Photosynthese	17
2.1.4. Einfluss von Stressfaktoren	19
2.2. Wasserstatusüberwachung: Etablierte Verfahren	23
2.2.1. Gravimetrische Wassergehaltsbestimmung	24
2.2.2. Wasserpotenzial und osmotischer Druck	24
2.2.3. Stomatäre Leitfähigkeit und Photosyntheseleistung	27
2.2.4. Infrarot-Reflektivität	28
2.2.5. Einordnung der Messverfahren	30
2.3. THz-Zeitbereichsspektroskopie	31
2.3.1. Photoleitende Antennen	33
2.3.2. Integration zu einem Gesamtsystem	34
2.3.3. Alternative Verzögerungskonzepte	37
2.3.4. Datenauswertung	38
2.4. Photomischung und THz-Quasi-Zeitbereichsspektroskopie	42
2.5. Sub-THz-Messtechnik	45
2.5.1. Gunn-Oszillator	45
2.5.2. Schottky-Detektor	47
3. THz-Messungen	49
3.1. Langzeit-Messungen	49
3.1.1. Versuchsaufbau	49
3.1.2. Pflanzen und Anzucht	53
3.1.3. Ablauf der Messungen und Datenauswertung	53
3.1.4. Fehlerquellen	55
3.1.5. Artefakte in den Messdaten	58
3.1.6. Ausreißer-Detektion und Filterung	62
3.1.7. Messreihen im Überblick	65
3.1.8. Pflanzenphysiologische Interpretation	81
3.1.9. Beschreibung als dynamisches System	95
3.2. Modellierung des Blattes als effektives Medium	99
3.2.1. Modellierung	99
3.2.2. Versuchsaufbau: Mobiles TDS-System	102
3.2.3. Messungen und Ergebnisse	103
3.3. THz-Quasi-Zeitbereichs-Messungen	105
3.3.1. Labor-Aufbau	105

3.3.2. Labor-Messungen	106
3.3.3. Kompakt-Aufbau	109
3.3.4. Freiland-Messungen	112
3.4. Qualitätskontrolle von Rüben-Saatgut	116
4. Sub-THz: kontaktlose Messung an ganzen Pflanzen	121
4.1. Versuchsaufbau und Messungen	121
4.2. Auswertung und Ergebnisse	123
5. Fazit und Ausblick	127
6. Zusammenfassung	129
7. Eigene Veröffentlichungen	133
8. Wissenschaftlicher Werdegang	137
A. Vollständige Langzeit-Messreihen	153
B. Grafische Darstellungsform: Boxplot	167

1. Einleitung

Wasser ist für das Leben auf der Erde von zentraler Bedeutung. Ohne Wasser wären die Vegetation auf der Erde und die Bevölkerung durch Lebewesen in der Form, wie wir sie kennen, unmöglich. Trotzdem wird die ausreichende Verfügbarkeit von Wasser oft als Selbstverständlichkeit angenommen. In vielen Regionen der Erde entspricht dieser selbstverständliche Umgang mit Wasser der alltäglich erlebten Realität. Dies darf jedoch nicht als allgemeingültig betrachtet werden. In Regionen mit nur geringen Niederschlagsmengen ist der landwirtschaftliche Anbau von Pflanzen oft nur durch zusätzliche Bewässerung möglich. Allerdings sind in diesem Fall auch die Wasserreserven beschränkt, die zur Bewässerung der Pflanzen zur Verfügung stehen. Zu den Aussagen des fünften Sachstandsberichts des zwischenstaatlichen Ausschusses über Klimaveränderung (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) gehört die Vorhersage, dass sich in Regionen, in denen jetzt schon Wasserknappheit herrscht, diese Knapptheit weiter verschärfen wird [1]. Vor diesem Hintergrund sind der Wasserhaushalt und insbesondere die Trockenstressresistenz von Nutzpflanzen von besonderer Bedeutung. Eine genaue Untersuchung von Pflanzen in dieser Hinsicht kann eine fundierte Entscheidungsgrundlage dazu geben, welche Pflanzen sich unter welchen Bedingungen besonders gut zum Anbau eignen. Diese Information kann insbesondere auch in die Zucht von Pflanzensorten einbezogen werden, deren Trockenstressresistenz optimiert werden soll. Für die Bewässerung von Pflanzen bei knappen Wasserreserven sollte das Prinzip „so viel wie nötig, so wenig wie möglich“ gelten. Um dieses Prinzip anwenden zu können, ist es jedoch notwendig zu wissen, bis zu welchem Punkt eine Pflanze Trockenheit ausgesetzt sein darf, ohne dass es dadurch zu dauerhaften Schäden kommt. Auch zur Beantwortung dieser Frage ist eine Überwachung des Wasserstatus der betreffenden Pflanzen notwendig. Mit dem Fortschreiten der technischen Entwicklung kommt auch die Echtzeit-Überwachung des Wasserstatus von Pflanzen im Anbau in Betracht, um die Regulation der Bewässerung direkt an den Zustand der Pflanzen zu koppeln.

Neben ihrer Bedeutung vor dem Hintergrund von Klimawandel und Wasserknappheit tragen derartige Untersuchungen grundsätzlich zum wissenschaftlichen Erkenntnisgewinn auf dem Gebiet der Pflanzenphysiologie bei. In diesem Bereich wurde in den vergangenen Jahren der Begriff des „Phenotyping Bottleneck“ geprägt [2]. Gemeint ist damit, dass es mittlerweile durch weitgehende Automatisierung vergleichsweise schnell und einfach möglich ist, das Genom einer Pflanze zu bestimmen. Das als Phänotyp bezeichnete reale Erscheinungsbild und das Verhalten einer Pflanze, die sich aus der Kombination des Genoms und der Umweltbedingungen, denen die Pflanze ausgesetzt ist, ergeben, müssen dennoch an lebenden Pflanzen untersucht werden. Diese Untersuchungen, die, um aussagekräftig zu sein, eine große Zahl an Pflanzen einbeziehen müssen, sind im allgemeinen sehr arbeits- und zeitaufwendig, wodurch der angesprochene „Flaschenhals“ entsteht. Es existieren Ansätze zur Automatisierung der Phänotypisierung von Pflanzen, die teilweise schon im großtechni-

schen Maßstab im Einsatz sind. Ein Großteil der Information über die untersuchten Pflanzen wird dabei durch grafische Datenverarbeitung gewonnen. Parameter wie Größe, Wachstum und Blattfläche können so effizient bestimmt werden. Weniger gut zugänglich ist bisher der Blattwassergehalt der Pflanzen, der durch die Bildanalyse nur indirekt bestimmt werden kann. Meist geschieht dies durch den Vergleich der Reflektivität der Blätter bei verschiedenen Wellenlängen im Infrarotbereich. In diesem Wellenlängenbereich interagiert das Licht jedoch neben dem Wasser auch mit dem sonstigen Pflanzenmaterial in merklichem Umfang. Wenn man über den Infrarotbereich hinaus zu längeren Wellenlängen geht, stellt man im Terahertz- und Mikrowellenbereich eine starke Interaktion der Strahlung mit flüssigem Wasser fest, während der Einfluss der festen Bestandteile der Pflanze stark abnimmt. Aus diesem Grund bietet sich die Terahertz-Spektroskopie als direkterer Zugang zur nicht-invasiven Messung des Blattwassergehalts an.

Flüssiges Wasser absorbiert Strahlung im THz-Frequenzbereich sehr stark [3, 4]. Im Allgemeinen stellt dies eine Einschränkung für die Anwendbarkeit von THz-Technik im biologischen und medizinischen Bereich dar, da dort die zu untersuchenden Proben in der Regel einen hohen Wassergehalt haben, der sie für THz-Strahlung praktisch undurchdringbar macht. Aus diesem Grund existieren Ansätze, die darauf abzielen, mittels Reflexionsmessungen auch stark absorbierende Proben untersuchen zu können [5]. Prinzipiell ist es, wie von Hajiloucas et al. [6] gezeigt, auch möglich, einen Zusammenhang zwischen der Reflektivität einer Probe im THz-Bereich und ihrem Wassergehalt herzustellen. Die Verwendung von Reflexionsmessungen stellt zwar eine Möglichkeit dar, manche Proben überhaupt untersuchen zu können, jedoch werden diese nur oberflächlich untersucht und das Problem der geringen Eindringtiefe bleibt bestehen.

Diese Einschränkungen entfallen, wenn die Dicke der zu untersuchenden Proben klein genug dafür ist, dass durch die Probe ein hinreichend großes Signal transmittiert wird. Die im Vergleich mit vielen anderen Materialien extrem große Absorption von THz-Strahlung durch flüssiges Wasser ist in diesem Fall kein Nachteil mehr, sondern kehrt sich zu einem Vorteil um, wenn es darum geht, den Wassergehalt einer dünnen Probe zu ermitteln. Die Blätter einer Pflanze sind in dieser Hinsicht sehr gut mittels THz-Spektroskopie untersuchbar. Die ersten Anfänge zur Untersuchung des Wassergehalts mittels THz-Spektroskopie stellen die 1995 von Hu und Nuss [7] und 1996 von Mittleman et al. [8] veröffentlichten per THz-Bildgebung aufgenommenen Bilder dar. Die Aufzeichnung der Bilder war zeitaufwendig und erforderte eine trickreiche Vorverarbeitung des aufgenommenen Signals, um die Datenmenge noch während der Aufzeichnung zu reduzieren. Nichtsdestotrotz war damit der Nachweis der prinzipiellen Tauglichkeit der THz-Technik für Blattwassergehaltmessungen erbracht. Im Fall von Hu und Nuss [7] wurde ein einzelnes von einer Pflanze abgeschnittenes Blatt im Abstand von 48 Stunden zweimal untersucht, wobei ein deutlicher Unterschied in der Transmission durch das Blatt zu erkennen war, der auf das Austrocknen des Blattes zurückgeführt wurde. Ähnliche Ergebnisse wurden später auch von Ririarte et al. [9] veröffentlicht. Mittleman et al. [8] nahmen ein Bild von einem Blatt einer Pflanze auf, die zuvor über einen längeren Zeitraum nicht bewässert worden war. Anschließend wurde die Pflanze wiederbewässert und es wurde eine aus dem Bildbereich herausgegriffene Zeile periodisch immer wieder abgerastert. Auf diese Weise wurde auch die Wiederaufnahme

des Wassers in ihrem zeitlichen Verlauf nachvollziehbar. Mit diesen Erkenntnissen übereinstimmende Ergebnisse eines ähnlichen Experiments wurden auch von Koch [10] veröffentlicht. Weitere Bilder, die unter Zuhilfenahme von Strahlung im THz-Frequenzbereich aufgezeichnet wurden und die über mehrere Tage fortschreitende Austrocknung eines Blattes zeigen, wurden von Zhang et al. [11] publiziert. Dabei handelt es sich im Gegensatz zu den zuvor genannten Veröffentlichungen allerdings nicht um THz-Zeitbereichsspektroskopie, sondern für diese Messungen wurde kontinuierliche Strahlung bei einer Frequenz von 189 GHz verwendet, die mittels einer Schottky-Diode detektiert wurde. Dementsprechend wird in einem solchen Aufbau keine frequenzabhängige spektroskopische Information gewonnen und auch die Phase des detektierten Signals wird nicht aufgezeichnet. Die Verwendung von kontinuierlicher THz-Strahlung zur Blattwassergehaltsbestimmung demonstrieren auch Breitenstein et al. [12] und Kinder et al. [13] unter Verwendung des Prinzips der Photomischung, das es erlaubt, neben der Amplitude des transmittierten Signals auch dessen Phase zu erfassen. Hadjiloucas et al. [14] zeigen Messungen des Blattwassergehalts mittels einer interferometrischen Messtechnik bei 94 GHz und mittels eines Fourier-Transformations-Infrarotspektrometers (FTIR) im Frequenzbereich vom 100 GHz bis 500 GHz. Dabei wird auch ein theoretischer Zusammenhang zwischen dem Blattwassergehalt und dem gemessenen Signal hergeleitet. Das dabei verwendete Modell setzt jedoch eine separate Messung der Dicke des Blattes voraus. In einer weiteren Veröffentlichung befassen sich Hadjiloucas et al. mit der Auswertung von mittels THz-Zeitbereichsspektroskopie aufgezeichneten Messdaten zur Blattwassergehaltsbestimmung unter Verwendung linearer Transformationen [15]. Dabei werden zwei verschiedene Ansätze demonstriert. Der eine Ansatz erlaubt eine quantitative Bestimmung des Blattwassergehalts unter Zuhilfenahme von Kalibrationsdaten, welche aus Messungen mit Blättern mit bekanntem Wassergehalt gewonnen werden. Der andere Ansatz erlaubt eine Klassifikation von an Blättern gemessenen THz-Spektren in Gruppen wie „feucht“, „trocken“ und „sehr trocken“. Ein Modell, welches ein Blatt als eine Mischung seiner verschiedenen Bestandteile beschreibt, wird von Jördens et al. [16] und Scheller et al. [17] konstruiert. Die Mischung der verschiedenen Bestandteile wird in diesem Modell als effektives Medium aufgefasst, dessen dielektrische Eigenschaften sich berechnen lassen, sofern die Eigenschaften der Mischungskomponenten und die Mischungsverhältnisse, in denen sie vorliegen, bekannt sind. Dieser Zusammenhang lässt sich wie Gente et al. [18] gezeigt haben, auch umkehren, so dass die Mischungsverhältnisse aus dem THz-Transmissionsspektrum einer Probe bestimmt werden können. Diese Art der Datenauswertung wird genauer in Abschnitt 3.2 beschrieben. Eine ähnliche Methode zur Bestimmung des Blattwassergehalts aus THz-Transmissionsspektren wird auch von Castro-Camus et al. [19] verwendet. Dabei demonstrieren Castro-Camus et al. außerdem die Überwachung des Blattwassergehalts von lebenden Pflanzen über einen Zeitraum von mehreren Tagen. Ein Versuchsaufbau, der erstmals Messreihen mittels eines THz-Zeitbereichsspektrometers an mehreren Pflanzen zugleich ermöglicht, wurde von Born et al. [20] konstruiert. Dabei können diese Messreihen über einen Zeitraum von mehreren Wochen ausgedehnt sein. Eine Weiterentwicklung dieses Konzepts wird von Gente und Koch [21] beschrieben und in Abschnitt 3.1 genauer dargestellt.

Einen alternativen Ansatz, bei dem an Stelle einzelner Blätter größere Teile einer Pflanze untersucht werden, stellt die Verwendung von Mikrowellenstrahlung knapp

unterhalb des THz-Frequenzbereichs dar. Eine Untersuchung der Eigenschaften von Pflanzenmaterial im Mikrowellenbereich stellten Ulaby und Jedicka [22] bereits 1984 vor. Möglichkeiten zur Nutzung des Mikrowellenbereichs zur Untersuchung von Pflanzen wurden von Ulaby et al. [23], Paloscia und Pampaloni [24, 25], Bouten et al. [26] und [27] vorgestellt. Ein Ansatz zur Nutzung von Mikrowellenstrahlung bei einer Frequenz von 35 GHz in einer Art und Weise, die neben der Transmission des Signals durch die Pflanze auch dessen Streuung an selbiger berücksichtigt, wird von Gente et al. [28] demonstriert. Der dazu verwendete Messaufbau und die damit erzielten Ergebnisse werden in Kapitel 4 dargestellt.

In der vorliegenden Arbeit soll die Untersuchung und Überwachung des Wasserstatus von Nutzpflanzen systematisch mit verschiedenen technischen Ansätzen aus dem Bereich der THz- und Sub-THz-Messtechnik erprobt werden. Neben der Darstellung der physikalischen Aspekte der Experimente sollen die Ergebnisse der Messungen auch in der Hinsicht interpretiert werden, welche Erkenntnisse sich daraus im Hinblick auf die Physiologie der untersuchten Pflanzen ableiten lassen. Diesen Untersuchungen ist in Kapitel 2 eine Darstellung der Grundlagen vorangestellt, auf denen die darauffolgenden Kapitel aufbauen. Dabei wird sowohl die Seite der Biologie und Pflanzenphysiologie beleuchtet als auch die Seite der Messtechnik und Physik. Kapitel 3 widmet sich der Anwendung der THz-Zeitbereichsspektroskopie. Den größten Teil nehmen dabei in Abschnitt 3.1 Langzeitmessungen mit einem zu diesem Zweck angepassten fasergekoppelten THz-Zeitbereichsspektrometer und die pflanzenphysiologische Interpretation dieser Messreihen ein. Dabei wurden Messungen an Roggen, Hafer, Weizen, Mais und Soja durchgeführt. Zusätzlich wird in Abschnitt 3.2 die Möglichkeit der Modellierung eines Blattes mittels der Theorie des effektiven Mediums diskutiert und experimentell erprobt. Wie in Abschnitt 3.3 dargestellt, wurden Messungen mit einem THz-Quasi-Zeitbereichsspektrometer sowohl im Labor als auch im Freien durchgeführt, wozu das Messsystem freilandtauglich umgestaltet wurde. Schließlich wird in Abschnitt 3.4 die Untersuchung der Qualität von Rübensaatgut mittels THz-Zeitbereichsspektroskopie demonstriert. In Kapitel 4 folgen Messungen im Sub-THz-Bereich, in denen an Stelle einzelner Blätter ein größerer Teil der Pflanze auf einmal auf seinen Wassergehalt hin untersucht wird. In Kapitel 5 folgt schließlich eine Einordnung der verschiedenen untersuchten Messverfahren hinsichtlich ihrer Verwendbarkeit je nach Einsatzzweck und ein Ausblick auf mögliche weitere Schritte auf Grundlage der vorliegenden Untersuchungen.

2. Grundlagen

Die Grundlagen, auf denen diese Arbeit aufbaut, lassen sich grob in zwei Bereiche gliedern. Einerseits sind dies die biologischen und pflanzenphysiologischen Grundlagen, auf denen die Konzeption und die Interpretation der Messungen basieren. Andererseits sind dies natürlich auch die physikalischen und technischen Grundlagen, die bei den Messungen, der Modellbildung und der Auswertung der Messergebnisse zur Anwendung kommen. Die Beschreibung der beiden Bereiche hat im Folgenden das Ziel, für Leser aus beiden Fachgebieten lesbar zu sein. Auch wenn der eine oder andere Punkt in diesem Kapitel einem Leser aus dem einen Fachgebiet sehr ausführlich oder selbstverständlich vorkommen mag, dient dies dazu, einem Leser aus dem jeweils anderen Fachgebiet die Lektüre zu erleichtern.

2.1. Pflanzenphysiologische Grundlagen

Die Physiologie einer Pflanze in ihrer Gesamtheit umfasst eine Vielzahl an chemischen und physikalischen Prozessen, welche in komplexer Weise ineinandergreifen und sich gegenseitig beeinflussen. Ausführliche Darstellungen dieser Zusammenhänge finden sich beispielsweise bei Heldt [29], Strasburger [30] und Schopfer[31]. Hier sollen im Folgenden einerseits diejenigen Vorgänge herausgegriffen und in ihren Grundzügen betrachtet werden, welche für die Wasseraufnahme und den Wasserverbrauch einer gesunden Pflanze vorrangig verantwortlich sind, und andererseits sollen die Auswirkungen von Trockenstress auf die Blätter einer Pflanze genauer beleuchtet werden.

2.1.1. Wasserpotenzial

Die Ausbreitung von Wasser in einer Pflanze folgt dem Wasserpotenzial, das von Schopfer und Brennicke definiert wird als

$$\psi = P - \pi + gh\rho_{H_2O}$$

und setzt sich zusammen aus dem hydrostatischen Druck P , dem osmotischen Druck π und dem Gravitationspotenzial $gh\rho_{H_2O}$ [31, Kap. 3]. Der Nullpunkt des Wasserpotenzials ist so definiert, dass $\psi = 0$ für reines Wasser bei Normaldruck und Normalniveau gilt. Wenn keine nennenswerten Höhenunterschiede vorliegen, z.B. wenn das Wasserpotenzial einer Zelle und ihrer direkten Umgebung betrachtet wird, wird der Term für das Gravitationspotenzial oft weggelassen, so dass übrig bleibt:

$$\psi = P - \pi$$

Damit Wasser ohne zusätzliche Energiezufuhr von einem Ort zu einem anderen strömt, muss zwischen diesen beiden Orten ein abfallender Gradient des Wasserpotenzials vorliegen. Wasser strömt also immer von einem Ort mit höherem zu einem

2. Grundlagen

Ort mit niedrigerem Wasserpotenzial. Da das Wasser sowohl im Boden als auch in einer Pflanze nicht in Reinform vorliegt, nimmt das Wasserpotenzial an beiden Orten negative Werte an, wobei die Werte innerhalb der Pflanze noch kleiner sein müssen als im Boden, damit die Pflanze von dort aus Wasser aufnehmen kann. Anschaulich kann das Wasserpotenzial, das üblicherweise in der Einheit Megapascal (MPa) angegeben wird, als der Druck aufgefasst werden, unter dem das Wasser steht, bzw. als der Unterdruck, mit dem es zu einem bestimmten Ort hingezogen wird. Bei dieser Betrachtungsweise ist zu beachten, dass der osmotische Druck zwar auch in MPa gemessen wird und eine dementsprechende Wirkung auf den Wassertransport entfaltet, jedoch keine direkten mechanische Auswirkungen beispielsweise auf eine Zellwand oder Membran hat. Direkt mechanisch wirksam sind nur der hydrostatische Druck und das Gravitationspotenzial. Der osmotische Druck entfaltet seine mechanische Wirkung indirekt, wenn ihm ein hydrostatischer Druck entgegensteht. Auch die Art und Weise wie Wasser in der Form von Wasserdampf von der Luft aufgenommen wird, lässt sich als Wasserpotenzial beschreiben [31, Kap. 3]:

$$\psi = \frac{RT}{\bar{V}_{H_2O}} \ln \frac{\text{rel. Luftfeuchte [\%]}}{100}$$

Dabei ist R die Gaskonstante ($8,314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) und T die Temperatur. \bar{V}_{H_2O} ist das partielle Molalvolumen von Wasserdampf. Unter dem Molalvolumen eines Stoffes wird die Volumenzunahme eines Systems verstanden, die durch die Zugabe von einem mol dieses Stoffes bewirkt wird. Oft wird dafür das einfacher zu ermittelnde Molvolumen eingesetzt, das aber wegen der nichtadditiven Volumenzunahme bei der Mischung von verschiedenen Stoffen nur einen Näherungswert darstellt. Das Wasserpotenzial von Luft erreicht bei einer relativen Luftfeuchte von 100% einen Wert von $\psi = 0$ und ist ansonsten immer negativ. Bei einer Temperatur von 25°C gilt $\frac{RT}{\bar{V}_{H_2O}} = 138 \text{ MPa}$. Daraus ergibt sich für eine relative Luftfeuchte von 50% ein Wert von $\psi_{\text{Luft}}^{25^\circ\text{C}} = -94 \text{ MPa}$. Das Wasserpotenzial von Luft ist in der Regel wesentlich kleiner als das im Inneren einer Pflanze, wodurch der weiter unten angesprochene Transpirationssog erklärt wird.

Die festen Bestandteilen des Bodens und der Pflanze erfüllen nicht nur eine mechanische Funktion, sondern ihre Oberflächen treten auch in Wechselwirkung mit dem Wasser, von dem sie berührt werden. Der dabei entstehende Unterdruck im kapillar gebundenen Wasser und der osmotische Druck, der durch die Wechselwirkung mit der Oberfläche hydrophiler Makromoleküle entsteht, ließen sich prinzipiell innerhalb der Summanden P und π im Wasserpotenzial berücksichtigen. Die Wechselwirkungen mit den Oberflächen werden aber oft als eigene Größe zum Matrixpotenzial τ zusammengefasst, so dass man erhält:

$$\psi = P - \pi - \tau$$

Die Bedeutung des Matrixpotenzials ist um so größer, je größer die in Wechselwirkung tretende Oberfläche im Verhältnis zur Menge des dort vorhandenen Wassers ist. Im Protoplasma kommt den Oberflächen von Membranen und Zellorganellen eine nennenswerte Bedeutung zu und auch im Boden ist die Oberfläche der Bodenkolloide nicht zu vernachlässigen. Wenn eine ausgewachsene Zelle mit wassergefüllter Vakuole insgesamt betrachtet wird, kann das Matrixpotenzial der Zellwand und des

Protoplasmas jedoch gegenüber dem osmotischen Druck der Vakuole vernachlässigt werden [31, Kap. 3].

2.1.2. Wassertransport

Die Versorgung einer Pflanze mit Wasser erfolgt bis auf wenige Ausnahmen über ihre Wurzel. Der Teil der von der Wurzel bis zu den Blättern reichenden Leitbündel, in dem der Wassertransport stattfindet, wird als Xylem bezeichnet. Die zur Wasseraufnahme fähige Oberfläche der Wurzel wird durch bis zu 2mm lange Ausstülpungen der Rhizodermiszellen, die sogenannten Wurzelhaare, vergrößert. Von dort ausgehend gibt es prinzipiell drei mögliche Wege bis ins Innere der Wurzel, wo das Wasser vom Xylem aufgenommen wird. Auf dem apoplastischen Weg bewegt sich das Wasser zwischen den äußeren Zellen der Wurzel hindurch ohne diese zu betreten. Grundsätzlich besitzt dieser Weg die größte Leitfähigkeit für Wasser. Allerdings wird er stellenweise durch die sogenannten Caspary-Streifen zwischen den Zellen eingeschränkt, welche insbesondere den Verlust von bereits aufgenommenem Wasser verhindern sollen, aber auch in Richtung der Wasseraufnahme einschränkend wirken. Hinzu kommen der symplastische Weg, welcher die Caspary-Streifen umgeht, dafür aber durch den Querschnitt der Plasmodesmen, welche die Zellen miteinander verbinden, eingeschränkt ist, und der transzelluläre Weg, welcher die Querschnittsfläche der sich berührenden Zellen nutzt, aber von der Wasserdurchlässigkeit der Zellmembranen abhängt. Zusätzlich sind auch Querverbindungen zwischen diesen drei Wegen möglich. In welchem Umfang die verschiedenen Wege jeweils zum Tragen kommen, kann von Pflanze zu Pflanze variieren.

Für den Transport von Wasser über eine Zellmembran hinweg ist ein osmotischer Druck notwendig. Dieser kann nötigenfalls durch den Transport von Ionen durch die Membran hergestellt und aufrechterhalten werden. Dafür dass stattdessen Wassermoleküle auf direkte Art und Weise durch eine Membran gepumpt würden, wurden bisher keinerlei Anhaltspunkte gefunden [31, Kap. 12]. Hilfreich für den osmotischen Transport von Wasser sind die Aquaporine, welche den Diffusionswiderstand einer Membran für Wasser erheblich reduzieren. Dabei handelt es sich um Transportproteine, die Kanäle bilden, welche selektiv für Wasser eine besonders gute Durchlässigkeit besitzen.

Um mit dem durch die Wurzel aufgenommenen Wasser die oberirdisch gelegenen Teile der Pflanze versorgen zu können, muss dieses je nach Größe der Pflanze über erhebliche Strecken transportiert werden. Der Langstreckentransport des Wassers dient dabei der Bereitstellung des Wassers für darauf basierende Stoffwechselprozesse, insbesondere für die Photosynthese, und dem Ausgleich des Wasserverlusts durch Transpiration, der unweigerlich mit dem Gasaustausch mit der Umgebungsluft zur Aufnahme von CO_2 verknüpft ist. Außerdem werden gemeinsam mit dem Wasser in Form von anorganischen Ionen weitere Stoffe transportiert, welche über die Wurzel aufgenommen werden und für die Pflanze lebensnotwendig sind. Im Xylem befinden sich die eigentlichen Gefäße, die entweder als Tracheen oder als Tracheiden ausgebildet werden [31, Kap. 13]. In beiden Fällen setzt sich das Gefäß aus toten Zellen zusammen, von denen nur die Zellwände erhalten sind. Im Fall von Tracheen sind die Zellwände zwischen diesen Zellen aufgelöst, so dass eine durchgängige Röhre entsteht. Im Fall von Tracheiden sind die Zellwände durch Tüpfel durchbrochen,

so dass ebenfalls eine durchgängige Verbindung entsteht. Das Aufsteigen des Wassers in den Gefäßen wird durch die Kapillarwirkung unterstützt, die aufgrund ihres geringen Durchmessers entsteht. Der Durchmesser der Gefäße bildet dabei einen Kompromiss zwischen einer Maximierung der Steighöhe, die durch einen möglichst geringen Durchmesser begünstigt wird, und dem Reibungswiderstand des strömenden Wassers, der einen beliebig kleinen Durchmesser unvorteilhaft macht. Mit daraus resultierenden Steighöhen von einigen Zentimetern ist die Kapillarwirkung der Gefäße durchaus eine relevante Größe, reicht aber nicht aus, um den Wassertransport bis in größere Höhen zu erklären. Der Transport des Wassers bis auf größere Höhen wird dem Transpirationssog zugeschrieben, welcher durch das Entweichen von Wasserdampf durch die Stomata der Blätter entsteht. Ob dies als alleinige Erklärung ausreicht, ist umstritten, da im allgemeinen Wasser ab einer Saughöhe von ca. 10m zu kochen beginnt, andererseits aber Bäume mit einer Höhe von über 100m existieren. Von Vertretern der Kohäsionstheorie wird dieser scheinbare Widerspruch dadurch aufgelöst, dass die Kohäsion der Wassermoleküle untereinander in einer dünnen Kapillare durch die Adhäsion an der Wand der Kapillare unterstützt wird, so dass mit wesentlich stärkerem Unterdruck daran gesaugt werden kann, ohne dass es zu Embolien in der Wassersäule kommt, als dies bei einem dickeren Rohr oder Schlauch der Fall wäre. In Modellexperimenten konnte diese Annahme bestätigt werden. Die Kohäsionstheorie, welche für das Wasser in den Gefäßen des Xylems eine größere Zugspannung postuliert als alleine durch ein daran saugendes Vakuum erzeugt würde, liegt also von den physikalischen Gegebenheiten her im Rahmen des Möglichen. Da gerade bei besonders hohen Bäumen die Druckverhältnisse im Xylem bisher aus technischen Gründen keiner Messung zugänglich sind, konnte jedoch noch nicht abschließend geklärt werden, ob die Theorie tatsächlich zutrifft. Man kann aber in jedem Fall davon ausgehen, dass die Menge des aufgenommenen und transportierten Wassers maßgeblich durch die Transpiration bestimmt wird, welche ständig durch entsprechende Wasseraufnahme ausgeglichen werden muss. Bemerkenswert ist dabei, dass die Aufnahme von Mineralien aus der Nährlösung des Bodens weitgehend unabhängig von der Menge des Wassers zu sein scheint, welche aufgrund der Transpiration durch die Pflanze strömt. Die die Pflanze durchströmende Wassermenge wurde in Experimenten an Mais und Gerstenpflanzen um den Faktor 2-4 variiert, ohne dass sich der Mineralgehalt im Spross änderte [31, Kap. 13]. Man kann also annehmen, dass bei der Regulation der Aufnahme von Mineralien durch die Wurzel deren Menge und nicht deren Konzentration in der Flüssigkeit die maßgebliche Größe ist. Da sämtliche in den folgenden Kapiteln untersuchten Nutzpflanzen wesentlich kleiner als 10m sind, stellt die offene Frage, ob der Wassertransport bis auf größere Höhen durch den Transpirationssog tatsächlich möglich ist oder nicht, hier kein Problem dar.

Ein Phänomen, das wiederum nicht alleine durch den Transpirationssog zu erklären ist, stellt die Guttation dar [31, Kap. 13]. Dabei handelt es sich um das Austreten von flüssigem Wasser aus den Blättern einer Pflanze durch sogenannte Hydathoden. Im Fall von passiven Hydathoden geschieht dies aufgrund des Wurzeldrucks, welcher unter gewissen Umständen dafür ausreichen kann, das Wasser aus den Blättern herauszupressen. Dies kann insbesondere im Fall von sehr hohen Luftfeuchtigkeiten, unter denen kaum noch Transpiration stattfindet, beobachtet werden. Bei einigen Pflanzen, wie z.B. bei Mais, tritt Guttation jedoch auch bei relativen Luftfechtig-

keiten weit unterhalb von 100% auf.

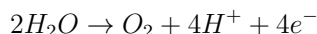
Insgesamt lässt sich also festhalten, dass der Wassertransport von der Wurzel bis in die Blätter einer Pflanze im wesentlichen durch die Kombination des osmotischen Wurzeldrucks, der Kapillarwirkung der Gefäße im Xylem und des Transpirationssogs bewirkt wird.

2.1.3. Photosynthese

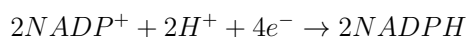
Die organischen Moleküle, aus denen Pflanzen aufgebaut sind, werden von diesen nicht in Form fertiger organischer Strukturen aufgenommen, sondern innerhalb der Pflanze synthetisiert [29, Kap. 2]. Dazu werden insbesondere Kohlenstoff und Wasserstoff benötigt. Der Kohlenstoff wird dem in der Luft enthaltenen Kohlenstoffdioxid entnommen, der Wasserstoff stammt aus dem durch die Wurzel aufgenommenen Wasser. Die für die Photosynthese nötige Energie wird der Reaktion durch die Absorption von Photonen zugeführt. Ihre charakteristische grüne Farbe erhalten die Chloroplasten, in welchen die Photosynthese stattfindet, durch die Lage der Absorptionsmaxima der Chlorophyll-Moleküle, welche im Bereich des roten und blauen Lichts liegen und den dazwischenliegenden grünen Bereich aussparen. Dabei lässt sich zwischen Chlorophyll-a und Chlorophyll-b unterscheiden, deren Absorptionsmaxima bei leicht verschiedenen Wellenlängen liegen. Zur Ausführung der eigentlichen Photosynthese-Reaktion ist dabei nur das Chlorophyll-a fähig. Hinzu kommen weitere Pigmente wie z.B. Carotinoide, deren Absorptionsmaxima sich wiederum von denen des Chlorophylls unterscheiden. [29, Kap. 2] Auf diese Weise wird die Effizienz der Energieaufnahme durch die Absorption von Licht verschiedener Wellenlängen erhöht. Der größte Teil der Pigmente ist ausschließlich für die Absorption der Photonen zuständig. Nur ungefähr jedes 300. Chlorophyll-Molekül sitzt in einem Reaktionszentrum, in welchem die eigentliche Photosynthese-Reaktion stattfindet. Nach der Absorption eines Photons befinden sich die Pigmente in einem angeregten Zustand und geben die aufgenommene Energie in Form von Excitonen an benachbarte Moleküle weiter, bis sie in einem der Reaktionszentren ankommt [29, Kap. 2].

Der Ablauf der Photosynthese-Reaktion lässt sich in die zwei Teilbereiche der Energieumwandlung und der Substanzumwandlung gliedern [32, Abs. 19.1]. Da nur bei der ersteren die Energie der absorbierten Photonen auf direktem Weg zum Einsatz kommt, wird dieser Teil der Photosynthese auch als Lichtreaktion bezeichnet, während für die Substanzumwandlung auch die Bezeichnung Dunkelreaktion existiert. Die letztere Bezeichnung darf aber nur so verstanden werden, dass das Licht nicht unmittelbar an den Reaktionen zum Aufbau von Kohlenhydraten auf Grundlage von CO_2 beteiligt ist. Es ist aber nicht etwa so, dass der als Dunkelreaktion bezeichnete Teil der Photosynthese tatsächlich im Dunkeln, also beispielsweise auch nachts, stattfinden würde, sondern beide Teile der Reaktion bauen unmittelbar aufeinander auf und können nur gemeinsam stattfinden [32, Abs. 19.1].

Die wesentliche Funktion der Lichtreaktion besteht in der Aufspaltung des Wassers in der Form

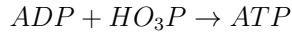


Daran schließt sich die Reaktion

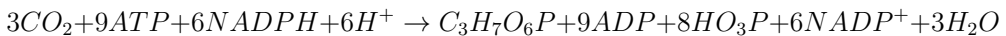


2. Grundlagen

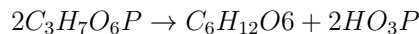
an [29, Kap. 3]. Beide Reaktionen erfolgen jeweils unter Einsatz von vier Excitonen als Energiequelle. Entsprechend der Reihenfolge ihrer Entdeckung werden die Reaktionszentren, in welchen die Spaltung des Wassers stattfindet, als Photosystem II bezeichnet, während die hier an zweiter Stelle genannte Reaktion im Photosystem I stattfindet. Die beiden Reaktionen finden auf zwei verschiedenen Seiten der Thylakoidmembran im Inneren der Chloroplasten statt. Der Protonengradient bei der Diffusion der H^+ durch die Membran wird gleichzeitig zur Bildung von ATP genutzt:



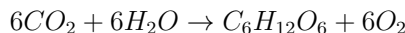
Die Menge des dabei gebildeten ATP ist nicht genau bestimmt. Aus dem Bedarf an ATP der nachfolgenden Reaktionen lässt sich jedoch folgern, dass für jedes hergestellte NADPH in etwa 1,5 ATP gebildet werden müssen. [29, Abs. 4.4] Die Fixierung des CO_2 unter Einsatz von $NADPH$ und ATP erfolgt durch den Calvin-Zyklus, welcher hier nicht im Detail dargestellt werden soll. Stattdessen soll hier nur die entsprechende Nettoreaktion betrachtet werden [29, Abs. 6.1]:



Da während des Calvin-Zyklus das CO_2 in Form von 3-Phosphoglycerat gebunden wird, welches drei Kohlenstoffatome enthält, werden Pflanzen, welche das CO_2 auf diese Weise fixieren, als C_3 -Pflanzen bezeichnet. Das 3-Phosphoglycerat wird noch während des Calvin-Zyklus in Triosephosphat umgewandelt, welches den Grundstoff für die Bildung verschiedener Kohlenhydrate darstellt [29, Kap. 9]. Aus zwei Molekülen Triosephosphat kann beispielsweise ein Molekül Glucose hergestellt werden:

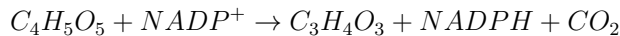


Wenn man nun alle oben beschriebenen Reaktionsschritte zusammengefasst betrachtet, ergibt sich als Nettoreaktion der Photosynthese [32, Abs. 19.1]:



Während der Photosynthese hat eine Pflanze einen wesentlich höheren Wasserbedarf als diese Nettogleichung vermuten lässt. Neben dem Wasser, welches bei der Photosynthese gespalten wird, geht der Pflanze ein Großteil des Wassers in Form von Wasserdampf verloren. Zur Fixierung von 1 mol CO_2 werden deshalb von einer C_3 -Pflanze 700 bis 1300 mol Wasser benötigt [29, Abs. 8.1]. Um CO_2 aufnehmen zu können, ist ein Gasaustausch mit der Umgebung zwingend notwendig. Sobald die Spaltöffnungen des Blatts geöffnet werden, kann aber auch Wasserdampf aus dem Inneren des Blattes entweichen. Der Gasaustausch mit der Umgebung wird durch die Schließzellen an den Spaltöffnungen der Blätter reguliert. Dabei wird der Gasaustausch mit der Umgebung gerade in dem Maße reguliert, dass im Inneren des Blattes eine ausreichende Konzentration an CO_2 vorhanden ist [29, Abs. 8.1]. Folglich führt eine verringerte CO_2 -Konzentration in der Umgebungsluft zu einem erhöhten Wasserbedarf der Pflanze, da bei erhöhtem Gasaustausch auch mehr Wasserdampf austreten kann. Wenn viele dicht stehende (Nutz-)Pflanzen durch Photosynthese die CO_2 -Konzentration in ihrer Umgebung verringern, sorgen sie folglich selbst dafür, dass ihr Wasserbedarf ansteigt. Wenn eine starke Lichteinstrahlung, eine geringe CO_2 -Konzentration und ein geringes Wasserangebot in Kombination auftreten,

stellt dies also eine besondere Herausforderung für eine Pflanze dar. Pflanzen, welche an derartige Bedingungen besonders gut angepasst sind, sind die sogenannten C_4 -Pflanzen. In den Blättern dieser Pflanzen wird in einem zusätzlichen Zwischenschritt das durch die Spaltöffnungen eintretende CO_2 zunächst in Form von Oxalacetat ($C_4H_4O_5$) gebunden. Der Name C_4 -Pflanze rührt also von den vier Kohlenstoffatomen in diesem Molekül her. In den Chloroplasten der Mesophyllzellen wird das Oxalacetat zu Malat ($C_4H_5O_5$) reduziert, welches in die kranzartig um die Leitbündel des Blattes angeordneten Bündelscheidenzellen diffundiert. Dort wird das CO_2 wieder freigesetzt und das Malat kehrt als Pyruvat ($C_3H_4O_3$) in die Mesophyllzellen zurück [29, Abs. 8.3]:



Nun folgen zur endgültigen Fixierung des CO_2 in den Bündelscheidenzellen die gleichen Reaktionen wie oben beschrieben. Das Endprodukt des Calvin-Zyklus ist also auch hier Triosephosphat. Die Effizienz dieses Vorgangs ist jedoch mit einem Bedarf von nur 400 bis 600 mol Wasser für ein mol CO_2 verglichen mit C_3 -Pflanzen in etwa doppelt so groß [29, Abs. 8.3].

2.1.4. Einfluss von Stressfaktoren

Stress liegt für eine Pflanze dann vor, wenn durch äußere Einflussfaktoren ihr Stoffwechsel oder ihre Entwicklung beeinträchtigt sind. Es gibt verschiedene Einflussfaktoren, die für eine Pflanze Stress erzeugen können. Zu den abiotischen Stressfaktoren zählen mechanische Belastung, Wasser, Salz, Hitze, Kälte, Frost, Sauerstoff, Licht und UV-Strahlung sofern diese in zu großer oder zu kleiner Konzentration auftreten [31, Kap. 26]. Für eine Pflanze ist es überlebensnotwendig dem Einfluss von Stressfaktoren durch Resistenz oder Akklimatisation zu begegnen, um auch unter nichtoptimalen Umweltbedingungen überleben zu können. Im Folgenden soll hier der Einfluss von Wassermangel auf eine Pflanze genauer beleuchtet werden. Wenn eine Pflanze wegen Wassermangel unter Trockenstress gerät, reagiert diese darauf zunächst in einer Art und Weise, die darauf abzielt, Wasserverlust zu vermeiden und den Schaden für die Pflanze möglichst gering zu halten. Mögliche Strategien zum Umgang mit Stressfaktoren sind Toleranz, Abwehr und Revertierung. Die ersten beiden Strategien zielen darauf ab, den Stressfaktor ohne gravierende Schäden zu überstehen, entweder indem die Bauweise der Pflanze von vornherein darauf ausgelegt ist, oder durch geeignete Schutzmechanismen, welche bei Bedarf aktiviert werden. Revertierung hingegen bezeichnet die nachträgliche Reparatur von unter Stress entstandenen Schäden [31, Kap. 26]. Im folgenden Abschnitt werden zunächst diejenigen Vorgänge beschrieben, bei denen es zu keinem bleibenden Schaden für die Pflanze kommt. Im Anschluss wird auf die Prozesse eingegangen, die aufgrund des Wassermangels zur vorzeitigen Alterung (Seneszenz) und somit letztendlich zum Absterben der Blätter führen. Der entscheidende Unterschied dieser beiden Fälle besteht darin, dass im ersteren Fall die Pflanze tatsächlich unter Trockenstress leidet, was aber nicht notwendigerweise mit einer messbaren Verringerung des Blattwassergehalts verbunden ist. Demgegenüber stellt das Absterben eines Blattes aufgrund von Wassermangel einen Vorgang dar, der nicht reversibel ist und somit erheblich über einen reinen Stresseinfluss hinausgeht.

2.1.4.1. Verhalten von Pflanzen unter Trockenstress

Toleranz gegenüber Trockenstress kann so weit gehen, dass z.B. viele Flechten und Moose mehr als 95% ihres Wassergehalts verlieren können ohne dauerhaften Schaden zu erleiden. Sie überdauern solche Trockenphasen in einem Dormanz genannten metabolischen Ruhezustand und können nach Wasseraufnahme schnell wieder ihre normale Stoffwechselaktivität fortsetzen. Bei den hier betrachteten Nutzpflanzen handelt es sich allerdings um Mesophyten, d.h. um Pflanzen, die weder an extreme Trockenheit noch an extreme Nässe angepasst sind. Für diese ist ein Wasserverlust von mehr als 30% in der Regel tödlich [31, Kap. 26]. Diese Pflanzen sind nur in beschränktem Umfang darauf eingerichtet, ein kurzzeitiges Wasserdefizit überstehen zu können. Unter starker Sonneneinstrahlung kann es vorkommen, dass der Wasserverlust durch Transpiration die Wasseraufnahme durch die Wurzel überwiegt. Bei guter Wasserversorgung wird dieser Wasserverlust nach kurzer Zeit, z.B. während der darauffolgenden Nacht, wieder ausgeglichen. Wenn das Wasserdefizit nicht ausgeglichen wird, hat das zur Folge, dass der Turgor, d.h. der im Inneren der Zelle vorherrschende hydrostatische Druck gegenüber der Zellwand, nicht mehr aufrecht erhalten werden kann. Eine Reaktion, die beim Nachlassen des Wasserpotenzials und des Turgordrucks sehr früh einsetzt, ist das Nachlassen des Wachstums, welches unmittelbar vom Turgor abhängt [31, Kap. 5]. Etwas später kommt es zu einer Abnahme der Chlorophyllsynthese, gefolgt von einer Zunahme der Synthese von Abscisinsäure. Wenn Trockenstress nicht schlagartig, sondern langsam nach und nach entsteht, können viele Pflanzen sich an die Gegebenheiten adaptieren und so ihre Resistenz gegenüber Trockenstress erhöhen [31, Kap. 26]. Eine solche Adaption kann z.B. darin bestehen, dass, während das Sprosswachstum gehemmt wird, stattdessen das Wurzelwachstum gefördert wird. So kann die Wurzel auf der Suche nach Wasser tiefer in den Boden eindringen und hat gleichzeitig nur eine kleinere Pflanze mit Wasser zu versorgen. Die Abscisinsäure (ABA), die unter Trockenstress vermehrt produziert wird, stellt für die Pflanze ein Stresshormon dar und hat damit Einfluss auf viele andere Trockenstressreaktionen der Pflanze. Die schon erwähnte Hemmung des Streckungswachstums lässt sich auch durch die künstliche Zugabe von ABA auslösen und auch die Proteinsynthese wird dadurch gehemmt. Ebenfalls durch ABA wird der Verschluss der Stomata ausgelöst, wodurch der Wasserverlust durch Transpiration gedrosselt wird. Gleichzeitig bedeutet der Verschluss der Stomata aber auch eine Drosselung der CO_2 -Assimilation durch Photosynthese. An dieser Stelle sei auch auf die C4-Photosynthese verwiesen, welche, wie in Abs. 2.1.3 beschrieben, durch ihre höhere Effizienz der CO_2 -Assimilation generell mit einer geringeren Öffnung der Stomata auskommt. Eine Möglichkeit, um den Turgor unter Trockenstress länger aufrecht erhalten zu können, besteht in der osmotischen Adaption, d.h. in der Erhöhung der Konzentration osmotisch wirksamer Substanzen in den Zellen [31, Kap. 26]. Diese Erhöhung der Konzentration von Osmotica im Zellinneren ist nicht auf eine passive Konzentrationssteigerung durch Wasserverlust zurückzuführen, sondern stellt einen aktiven Prozess dar, der durch die vermehrte Aufnahme oder Freisetzung von Stoffwechselprodukten wie Zucker oder Aminosäuren und Ionen zustande kommt. Solange der Turgor durch osmotische Adaption aufrecht erhalten werden kann, werden andere vom Turgor abhängige Prozesse wie Wachstum und Stomataöffnung vom Einfluss des Trockenstress verschont. Die Aufrechterhaltung des Wachstums durch osmotische Adaption betrifft dabei nicht nur

den Spross, sondern insbesondere auch die Wurzel, wodurch das gesteigerte Wurzelwachstum unter Trockenstress unterstützt wird. [31, Kap. 26]. Die Erhöhung der Trockenstressresistenz durch derartige Adaptionsprozesse ist in der Regel reversibel und verschwindet, sobald wieder genug Wasser zur Verfügung steht. Es kommt aber auch vor, dass Pflanzen unter Trockenstress erworbene Anpassungen über einen Zeitraum von Tagen oder Wochen beibehalten. Dieser Vorgang wird als Akklimatisation bezeichnet. Wenn eine Pflanze sich an ein geringeres Wasserangebot akklimatisiert hat, äußert sich dies unter anderem durch ein späteres Einsetzen der ABA-Synthese und des Stomataverschlusses.

2.1.4.2. Durch Wassermangel verursachte Seneszenz von Blättern

Man darf sich das Austrocknen eines Blattes an einer Pflanze auch im fortgeschrittenen Stadium, wenn das Blatt nicht mehr zu retten ist, nicht als einfachen physikalischen Vorgang vorstellen, der analog zum Trocknen z.B. eines feuchten Papiertuches ablaufen würde. Zu dieser Art des Austrocknens kommt es bei einem Blatt an einer lebenden Pflanze erst sehr spät. Bevor es so weit kommt, laufen auch in einem von der Pflanze bereits aufgegebenen Blatt geordnete Prozesse ab, welche dazu dienen, dem Blatt vor seinem endgültigen Tod zunächst noch diejenigen Bestandteile zu entziehen, welche sich in anderen Teilen der Pflanze noch nutzen lassen. Der Begriff Seneszenz bezeichnet diesen speziellen Prozess, während unter dem allgemeineren Begriff der Alterung alle Prozesse zusammengefasst werden können, die im Laufe der Zeit in irgendeiner Art und Weise die Pflanze beeinträchtigen, ohne dass das Ziel dieser Prozesse der programmierte Zelltod sein muss. Der Rückbau des Blattes durch Seneszenz stellt dessen letzte Entwicklungsstufe dar und findet üblicherweise am Ende von dessen natürlicher Lebensspanne statt. Unter Trockenstress kann es jedoch dazu kommen, dass die Seneszenz einzelner Blätter schon früher einsetzt. Auf diese Weise kann die Transpiration der Pflanze insgesamt verringert werden, wodurch die verbleibenden Blätter besser mit Wasser versorgt werden können. Der Verlust von einzelnen Blättern wird also in Kauf genommen, um Ressourcen für andere Blätter freizusetzen bzw. zu sparen. Zu Beginn ist der Prozess der trockenstressinduzierten Seneszenz noch reversibel und kann durch Wasserzugabe gestoppt, bzw. rückgängig gemacht werden. In der Endphase der Seneszenz hingegen ist der Zelltod zwar noch nicht eingetreten, aber bereits so weit vorbereitet, dass der Prozess nicht mehr umkehrbar ist [33].

Munné-Bosch und Alegre [33] teilen den Vorgang der Seneszenz unter Trockenstress in drei Phasen ein. Die Initiierungsphase markiert den Beginn des Vorgangs und resultiert in der Änderung der Konzentrationen von regulierenden Stoffen wie Cytokinin, ABA und reaktiven Sauerstoffspezies (ROS). Darauf folgt die Phase der Reorganisation, in der durch das Zusammenspiel dieser Stoffe und ihrer Verteilung in den Zellen der Pflanze im weiteren Verlauf die Expression von mit Seneszenz assoziierten Genen (SAG) reguliert wird. Auf diesem Weg wird der Ablauf der Seneszenz des Blattes gesteuert, die schließlich mit der dritten, terminalen Phase im programmierten Zelltod endet. Prozesse, die während der Phase der Reorganisation stattfinden, sind der Rückgang der photosynthetischen Aktivität, der Abbau von Chlorophyll und das Auflösen der Integrität der Zellen [33]. Diese Vorgänge dienen der Remobilisierung von im Blatt enthaltenen Nährstoffen. Das Blatt, das normalerweise als Verbraucher von bestimmten Nährstoffen auftritt, wird während der

Seneszenz also zu einer Quelle zur Versorgung anderer Teile der Pflanze. Durch den Rückgang der Photosyntheseleistung eines Blattes unter Trockenstress erreicht es irgendwann den Punkt, an dem die Assimilation von CO_2 und die Abgabe von CO_2 durch Photorespiration sich gegenseitig aufheben und das Blatt in der Bilanz keinen Nutzen mehr für die Pflanze darstellt. Es enthält zu diesem Zeitpunkt jedoch noch eine erhebliche Menge an Nährstoffen in Form von Proteinen, Lipiden und anderen Makromolekülen. Sichtbar wird die Mobilisierung dieser Stoffe vor allem durch den Abbau des Chlorophylls, der die typische gelbe Verfärbung seneszenten Blätter zur Folge hat. Zu der gelben Verfärbung kommt es dadurch, dass nach dem Verschwinden des Chlorophylls die ebenfalls im Blatt enthaltenen Karotinoide sichtbar werden, die während der Seneszenz verglichen mit dem Chlorophyll nur zu einem kleinen Anteil abgebaut werden. Es wird jedoch angenommen, dass die Seneszenz nicht erst mit dem sichtbaren Abbau des Chlorophylls beginnt, sondern dass die Expression von SAGs und der Rückgang der Photosyntheseleistung schon früher einsetzen [33]. Durch welche Signale genau die Seneszenz von Blättern unter Trockenstress gestartet wird, ist allerdings noch nicht erforscht. Zudem können unter Trockenstress, wie in Abschnitt 2.1.4.1 beschrieben, auch Vorgänge ablaufen, die zwar ebenfalls Veränderungen der Genexpression und eine reduzierte Photosyntheseleistung zur Folge haben können, aber nicht notwendigerweise die Seneszenz des Blattes einleiten. Ob man es mit durch Trockenstress ausgelöster Seneszenz zu tun hat, lässt sich also nicht an einem einzelnen Merkmal festmachen, sondern man kann dann davon ausgehen, dass diese vorliegt, wenn insgesamt die gleichen Symptome auftreten wie bei der Seneszenz eines Blattes am natürlichen Ende seiner Lebenszeit. Wenn der durch die Seneszenz verursachte Abbau der Zellbestandteile beginnt, gehören die Chloroplasten zu den ersten Zellorganellen, die dem Abbau zum Opfer fallen, während Zellkerne und Mitochondrien wesentlich länger erhalten bleiben. Der kontrollierte Abbau des Chlorophylls unterstützt dabei auf verschiedene Weise die gleichzeitig oder darauf folgend stattfindenden weiteren Vorgänge. Auf diese Weise wird das Risiko von Schäden durch die Bildung von Singlett-Sauerstoff in den Thykaloiden verringert, die Lichtabsorption insgesamt wird verringert, was das Aufheizen des Blattes vermindert, zumal in einem gestressten Blatt mit geschlossenen Stomata keine Kühlung durch Transpiration mehr stattfindet, und durch das geänderte Verhältnis zwischen Chlorophyll und Karotinoiden und Tocopherolen können oxidative Schäden unter Lichteinfluss besser abgewehrt werden. Dieser Schutz ist auch gerade in einem Blatt, das im Begriff ist, sich selbst aufzulösen, noch wichtig, damit dieser Prozess nicht zu schnell abläuft, was möglicherweise die Mobilisierung der im Blatt verbliebenen Nährstoffe beeinträchtigen könnte. Der Abbau des Chlorophylls ermöglicht neben dieser Schutzfunktion auch die Wiederverwendung seiner Bestandteile in anderen Teilen der Pflanze. Wichtiger ist in diesem Zusammenhang aber, dass nach dem Abbau des Chlorophylls auch die kompletten Chloroplasten abgebaut werden können, wodurch in etwa 75% des in einem Blatt enthaltenen Stickstoffs abtransportiert und wiederverwendet werden können [33].

Wie oben erwähnt ist das genaue Zusammenwirken der verschiedenen die Seneszenz beeinflussenden Stoffe als regulatorisches Netzwerk noch nicht vollständig aufgeklärt. Es konnte jedoch insbesondere die Bedeutung von Cytokinin und ABA experimentell belegt werden [33]. Während hohe Konzentrationen von ABA die Seneszenz beschleunigen, wirken hohe Konzentrationen von Cytokinin ihr entgegen.

Auf dieser Erkenntnis lässt sich ein Erklärungsansatz aufbauen, wieso tendenziell bei älteren Blättern die Seneszenz früher einsetzt als bei jüngeren. Cytokinin kann sowohl in der Wurzel als auch in den Blättern gebildet werden, jedoch sind ältere Blätter dazu schlechter in der Lage als jüngere. Solange ausreichend Cytokinin in der Wurzel gebildet wird, stellt dies kein Problem dar. Wenn aber bei schlechter Nährstoffversorgung der Wurzel, wie sie unter Trockenstress auftreten kann, die Synthese von Cytokinin in der Wurzel vermindert wird, können die jüngeren Blätter den Stoff noch selbst synthetisieren, während es in den älteren Blättern schneller zu einem Mangel kommt, der deren Seneszenz begünstigt. Andere Studien legen jedoch nahe, dass eine verringerte Konzentration an Cytokinin zwar eine Voraussetzung aber nicht der alleinige Auslöser für Seneszenz ist [33].

Auch wenn die genauen Zusammenhänge der Regulation noch nicht geklärt sind, lässt sich festhalten, dass durch die Seneszenz nach und nach einerseits immer mehr Zellorganellen abgebaut werden, während der oxidative Stress durch ROS immer weiter zunimmt. Dies beides führt im letzten Schritt schließlich zum Zelltod des seneszenten Blattes. Neben dem offensichtlichen Effekt der Einsparung von Wasser und anderen Ressourcen kann damit auch ein verfrühter Übergang vom Wachstum zur Reproduktion einhergehen [33]. So wird nicht nur die Überlebenswahrscheinlichkeit der einzelnen Pflanze unter Trockenstress erhöht, sondern es wird insbesondere hapaxanthen Pflanzen ermöglicht, auch unter erschwerten Bedingungen ihren Lebenszyklus mit der Bildung von Samen zu vollenden.

2.2. Wasserstatusüberwachung: Etablierte Verfahren

Unter dem Begriff des Wasserstatus werden verschiedene messtechnisch erfassbare Größen zusammengefasst, welche die Versorgung einer Pflanze mit Wasser, die Aufnahme desselben durch die Pflanze und den daraus resultierenden Wassergehalt der Pflanze widerspiegeln. Solche Messungen können verwendet werden, um den Wasserhaushalt einer Pflanze und deren Verhalten unter verschiedenen Umweltbedingungen zu erforschen. Die verschiedenen Herangehensweisen, die dafür existieren, unterscheiden sich jedoch in ihrer physikalischen Funktionsweise, so dass sich deren Messergebnisse auch in ihrer pflanzenphysiologischen Bedeutung unterscheiden. Außerdem lassen sich die verschiedenen Methoden einteilen in invasive Verfahren, die mit einer Verletzung der Pflanze oder sogar mit dem Abtrennen von Pflanzenteilen einhergehen, und nicht-invasive bzw. zerstörungsfreie Verfahren, die evtl. mechanischen Kontakt zur Pflanze erfordern, aber nicht in diese eindringen. Zu den invasiven Verfahren gehören die gravimetrische Wassergehaltsbestimmung, die Messung des Wasserpotenzials mittels einer Druckkammer oder eines Psychrometers und die Messung des osmotischen Potenzials mittels eines Osmometers. Zu den nicht-invasiven Verfahren zählen die Messung der Transpiration bzw. der Stomataöffnung mittels eines Porometers, die Messung der Photosyntheseleistung anhand der aufgenommenen Menge an CO_2 und Messungen der optischen Reflektivität im sichtbaren bis infraroten Bereich, aus denen Kenngrößen wie der „Normalized Differential Vegetation Index“ (NDVI) oder der „Normalized Differential Water Index“ (NDWI) errechnet werden können.

2.2.1. Gravimetrische Wassergehaltsbestimmung

Ein sehr direktes und vergleichsweise einfaches Verfahren zur Bestimmung des Wassergehalts einer Probe besteht in der gravimetrischen Wassergehaltsmessung [34]. Das Grundprinzip des Verfahrens basiert auf der Idee, zunächst das Gewicht der frischen Probe zu bestimmen, diese anschließend vollständig zu trocknen und dann die Trockenmasse zu bestimmen. Aus dem Ergebnis beider Messungen lässt sich der ursprüngliche Wassergehalt der Probe einfach ausrechnen:

$$W_{\%} = \frac{m_{\text{frisch}} - m_{\text{trocken}}}{m_{\text{frisch}}} \quad (2.1)$$

Gebräuchlicher ist allerdings die Angabe des relativen Wassergehalts, der sich nicht auf die Frischmasse der Probe bezieht, sondern auf deren maximale Fähigkeit zur Wasseraufnahme. Um diesen Wert zu bestimmen, wird zusätzlich zu den beschriebenen Messungen die Probe vollständig mit Wasser gesättigt und abermals ihre Masse bestimmt. Der relative Wassergehalt (RWC, Relative Water Content) errechnet sich dann als [34–36]:

$$RWC = \frac{m_{\text{frisch}} - m_{\text{trocken}}}{m_{\text{gesättigt}} - m_{\text{trocken}}} \quad (2.2)$$

Der relative Wassergehalt stellt einen Ansatz dar, eine bessere Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Pflanzenarten zu gewährleisten. Anatomische Unterschiede der Blätter können dazu führen, dass für verschiedene Pflanzenarten der zahlenmäßig gleiche prozentuale Wasseranteil sehr verschiedene Auswirkungen auf den Zustand der Pflanze hat. Die Normierung auf die maximale Aufnahmefähigkeit der Probe soll solche Unterschiede kompensieren, so dass Messwerte verschiedener Pflanzenarten vergleichbar werden. Zur groben Einordnung von Zahlenwerten des relativen Wassergehalts geben Schopfer und Brennicke an, dass bei einer Reduktion auf 70-80% bereits zentrale Stoffwechselfunktionen wie die Photosynthese gehemmt werden und dass das Unterschreiten eines relativen Wassergehalts von 50-60% in den meisten Fällen zum Zelltod führt [31, Kap. 12].

2.2.2. Wasserpotenzial und osmotischer Druck

Eine Möglichkeit zur Bestimmung des Wasserpotenzials und des osmotischen Drucks in einer Zelle bzw. in einem Gewebestück besteht darin, dieses in Testlösungen unterschiedlicher Osmolalität einzubringen und das Verhalten der Zellen dabei zu beobachten [31, Kap. 3]. Wenn sich das Volumen der Zellen nicht ändert, besitzen diese dasselbe Wasserpotenzial wie die Testlösung. Wenn hingegen Grenzplasmolyse, d.h. das beginnende Ablösen der Vakuole von der Zellwand zu beobachten ist, ist das ein Zeichen dafür, dass der hydrostatische Druck die Vakuole nicht mehr von innen gegen die Zellwand drückt. An diesem Punkt entspricht der osmotische Druck im Inneren der Zelle gerade dem osmotischen Druck der Testlösung.

Der osmotische Druck von extrahiertem Zellsaft kann auch in einem Osmometer gemessen werden. Ein solches basiert auf der Messung des hydrostatischen Drucks, der sich einstellt, wenn die zu untersuchende Lösung getrennt durch eine selektiv für Wasser permeable Membran mit reinem Wasser in Kontakt gebracht wird [31, Kap. 3]. In der einfachsten Bauweise ist an dem ansonsten komplett verschlossenen Behälter mit der Lösung, der in das Wasser eingetaucht wird, ein Steigrohr angebracht, an

dem der Druck, der sich im Inneren des Behälters einstellt, direkt abgelesen werden kann. Allerdings ist mit dem Aufsteigen der Flüssigkeit im Steigrohr auch die Aufnahme von Wasser durch die Membran verbunden, wodurch sich die Konzentration der Lösung leicht ändert. Dies wird vermieden, wenn dem osmotischen Druck ein hydrostatischer Druck entgegengesetzt wird, der gerade das Einstromen von Wasser durch die Membran verhindert. Die Größe dieses Drucks repräsentiert dann gerade die Größe des osmotischen Drucks der Lösung.

Das Wasserpotenzial einer Probe kann auch ermittelt werden, indem diese in eine verschlossene Messkammer eingebracht wird, in der sich daraufhin ein Wasserdampfdruck einstellt, der dem Wasserpotenzial der Probe entspricht. Durch eine Messung der relativen Luftfeuchte innerhalb der Kammer lässt sich so das Wasserpotenzial der Probe bestimmen [37–40]. In ihrer ursprünglichen Form wird für diese Art von Messung das Prinzip des Psychrometers angewendet, das auf der Temperaturdifferenz beruht, die sich zwischen einem trockenen und einem befeuchteten Temperaturfühler innerhalb der Messkammer einstellt. Für die Messung dieser Temperaturdifferenz sind Thermoelemente gut geeignet, da ihr Funktionsprinzip direkt darauf abzielt, die Temperaturdifferenz zwischen einer Messstelle und einer Vergleichsstelle zu bestimmen. Das Befeuchten des Thermoelements an der Messstelle kann auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Entweder wird dort von Hand vor Beginn der Messungen ein Tropfen Wasser aufgebracht, oder man macht sich zunutze, dass der Seebeck-Effekt, auf welchem das Thermoelement beruht, nicht nur zur Messung, sondern auch zur Herstellung einer Temperaturdifferenz genutzt werden kann. Mittels einer externen Stromquelle kann so die Messstelle abgekühlt werden, bis sie den Taupunkt erreicht und sich dort Wasser aus der Umgebung niederschlägt. Dabei ist aber zu beachten, dass sich die Vergleichsstelle im gleichen Maße erwärmt wie die Messstelle abgekühlt wird und diese Wärme von dort abgeführt werden muss [40]. Diese Art der Peltier-Kühlung der Messstelle kann entweder genutzt werden, um diese zu befeuchten und anschließend eine Messung in derselben Art und Weise durchzuführen wie wenn sie von Hand befeuchtet worden wäre, oder die Kühlleistung kann so geregelt werden, dass die Messstelle konstant auf der Taupunkttemperatur gehalten wird [37, 40]. Eine alternative Methode zur Bestimmung des Wasserpotenzials einer Probe stellt das Prinzip des Taupunktspiegelhygrometers dar [41]. Dieses basiert darauf, dass die Reflektivität eines in der Messkammer angebrachten Spiegels gemessen wird, während dessen Temperatur heruntergekühlt wird. Die Taupunkttemperatur als Maß für die relative Luftfeuchte der Luft in der Messkammer wird dadurch detektiert, dass der Spiegel beginnt zu beschlagen, sobald er diese Temperatur erreicht, was sich in einer Verringerung seiner Reflektivität äußert. Psychrometer existieren sowohl als Tischgeräte mit einer rundum geschlossenen Messkammer, in die als Probe beispielsweise ein von einer Pflanze abgeschnittenes Blatt oder eine Bodenprobe eingebracht werden kann, als auch in Bauformen, welche Messungen *in situ* ermöglichen. Für Messungen an einem Blatt oder am Stamm einer Pflanze wird dazu eine Messkammer verwendet, welche zu einer Seite geöffnet ist. Mit dieser Öffnung wird die Messkammer gegen das Blatt oder gegen den Stamm gedrückt und mit Fett oder Wachs abgedichtet [38]. Für die Messung des Wasserpotenzials im Boden oder an Blättern müssen in der Messkammer relative Luftfeuchtigkeiten oberhalb von 90% gemessen werden. Insbesondere im Fall von Blättern bewegen sich diese Werte oft sehr nah an 100% heran. Die in der Praxis relevanten Messwerte be-

wegen sich also innerhalb eines schmalen Intervalls und müssen dementsprechend genau detektiert werden. Eine Fehlerquelle bei der Messung ist insbesondere die Verfälschung der gemessenen Temperaturen bzw. Temperaturdifferenzen durch ungewollten Wärmeaustausch mit der Umgebung des Messgeräts. Naturgemäß lassen sich solche Effekte in einem Laborgerät leichter unter Kontrolle bringen als bei einem Gerät, welches im Freien für Messungen *in situ* verwendet wird. Im Fall von letzterem müssen oft zusätzliche Maßnahmen getroffen werden zur thermischen Isolation des Messgeräts gegenüber Sonneneinstrahlung und anderen Umwelteinflüssen. Damit das Messverfahren funktioniert, muss eine direkte Verbindung zwischen der Probe und der Messkammer bestehen. Das bedeutet bei einer Messung an einem Blatt, dass dessen Cuticula gezielt verletzt werden muss [38, 39]. Das kann durch Abschmirgeln oder durch Einritzen mit einem scharfen Gegenstand geschehen. Die schützende Wirkung der Cuticula, die unkontrolliertes Entweichen von Wasserdampf eigentlich vermeiden soll, muss also aufgehoben werden. Im Fall von Messungen an einem Baumstamm muss an der betreffenden Stelle die Rinde entfernt werden, um den direkten Kontakt zum saftführenden Holz herzustellen [42].

Eine weitere Möglichkeit zur experimentellen Bestimmung des Wasserpotenzials besteht in der Druckbombe nach Scholander [31, Kap. 3]. Es handelt sich dabei um eine Druckkammer, in die ein von einer Pflanze abgeschnittenes Blatt eingebracht wird. Es wird angenommen, dass das Wasserpotenzial im Blatt nach dem Abschneiden zunächst konstant bleibt. Nach dem Durchtrennen des Blattstengels wird das Wasser aus diesem durch das Wasserpotenzial des Blatts ein Stück weit in das Blatt hineingezogen. In der Druckkammer wird das Blatt nun so angebracht, dass die Schnittfläche des Stengels aus ihr heraussteht, während sich ansonsten das komplette Blatt in Inneren befindet. Nun wird der Luftdruck in der Druckkammer erhöht, bis das Wasser an der Schnittfläche des Stengels wieder sichtbar wird. An diesem Punkt entspricht der von außen aufgebrachte Druck dem Wasserpotenzial des Blattes vor dem Abschneiden [31, Kap. 3]. Durch weiteres Erhöhen des Druckes kann Wasser aus dem Blatt herausgepresst werden, wodurch der relative Wassergehalt des Blattes verringert wird. Wenn man den Kehrwert des Wasserpotenzials $1/\psi_{\text{Blatt}} = -1/P_{\text{außen}}$ über dem relativen Wassergehalt aufträgt, enthält die resultierende Kurve zwei näherungsweise lineare Abschnitte mit verschiedener Steigung. Ausgehend von einem vollturgeszenten Blatt beginnt die Kurve bei einem relativen Wassergehalt von 100% und einem Wasserpotenzial nahe $\psi = 0$. Mit sinkendem relativem Wassergehalt nimmt das Wasserpotenzial $\psi = P - \pi$ steil ab, bis sich der hydrostatische Druck dem Wert $P = 0$ nähert. Ab diesem Punkt wird das Wasserpotenzial des Blattes nur noch von $\psi = -\pi$ bestimmt und die Kurve geht über in einen zweiten Abschnitt mit wesentlich geringerer Steigung. Durch Extrapolation dieses flacheren Abschnitts lässt sich der osmotische Druck auch zu Zeitpunkten zu Beginn des Experiments bestimmen, zu denen auch P noch einen nennenswerten Anteil am Wasserpotenzial hatte. Der hydrostatische und der osmotische Druck können auf diese Weise rechnerisch voneinander getrennt werden.

Der hydrostatische Druck in der Zelle kann mit Hilfe einer Mikrodrucksonde auch direkt gemessen werden [31, Kap. 3]. Zu diesem Zweck wird eine mit Silikonöl gefüllte Mikropipette aus Glas mit einem Spitzendurchmesser von $5\mu\text{m}$ in die Vakuole der Zelle eingestochen. Sofern es sich um eine turgeszente Zelle handelt, drückt der hydrostatische Druck im Inneren der Zelle den Zellsaft aus der Vakuole ein Stück weit

in die Mikropipette hinein. Nun wird der Druck in der Mikropipette langsam erhöht und unter dem Mikroskop beobachtet, wie die Grenzfläche zwischen Silikonöl und Zellsaft wieder bis auf Höhe der Zellwand zurückgeschoben wird. Wenn diese Stelle erreicht ist, entspricht der in der Mikrosonde eingestellte Druck dem hydrostatischen Druck in der Zelle.

2.2.3. Stomatäre Leitfähigkeit und Photosyntheseleistung

Die stomatäre Leitfähigkeit eines Blattes wird dadurch bestimmt wie weit dessen Stomata geöffnet oder geschlossen sind. Messen lässt sich dies mit Hilfe eines Diffusionsporometers an der Menge des transpirierten Wasserdampfes. Das Grundprinzip der Messung basiert dabei darauf, dass die Luftfeuchtigkeit in einer mit der Blattoberfläche in Verbindung stehenden Messkammer gemessen wird [43–48]. Anders als beim oben erwähnten Psychrometer wird die Blattoberfläche aber intakt gelassen, so dass der Gasaustausch mit dem Inneren des Blattes nur durch die Stomata möglich ist. Außerdem ist die Messkammer gegenüber der Umgebung nicht komplett verschlossen, sondern es wird in definierter Weise ein Austausch der Luft in der Messkammer ermöglicht. Für die konkrete Umsetzung der Messung existieren drei verschiedene Bauarten von Diffusionsporometern, die sich in der Art und Weise unterscheiden, wie die Luft in der Messkammer ausgetauscht wird.

Ein mögliches Verfahren besteht darin, die Messkammer mit getrockneter Luft mit einer definierten Luftfeuchte zu füllen [44, 46, 47]. Zum Trocknen der Luft kann diese durch einen Behälter mit einem Entfeuchtungsmittel gepumpt werden. Anschließend wird die Zeit gemessen, die es braucht, bis die Luftfeuchte um einen bestimmten Betrag angestiegen ist, oder der Anstieg der Luftfeuchte in einem vordefinierten Zeitintervall wird gemessen. In der Theorie besteht die Möglichkeit aus diesen Messwerten direkt die stomatäre Leitfähigkeit zu berechnen. In der Praxis wird jedoch eine Kalibrierung mit einer Referenzprobe vorgenommen, um in der Theorie nicht berücksichtigte Einflüsse wie z.B. die Reaktionszeit des Feuchtesensors zu kompensieren [46]. Diese Referenzprobe besteht aus einem Blech mit feinen Löchern bekannter Größe und Leitfähigkeit, auf das ein feuchtes Filterpapier gelegt wird. Die Genauigkeit der Messung hängt von der genauen Ausgestaltung der Messanordnung und dem verwendeten Feuchtesensor ab. Dadurch, dass diese Sorte Porometer eine sorgfältige Kalibrierung erfordert, ist ihre Verwendung vergleichsweise arbeitsintensiv.

Ein anderes Konstruktionsprinzip für ein Porometer besteht darin, einen kontinuierlichen Zufluss von trockener Luft so zu regeln, dass sich in der Messkammer ein konstanter Wert der Luftfeuchte einstellt [43, 46]. Um die stomatäre Leitfähigkeit errechnen zu können, werden die Luftfeuchte in der Messkammer, die Durchflussrate der trockenen Luft, die an der Messung beteiligte Blattfläche und die Temperatur des Blattes benötigt. Die zu messenden Werte der Luftfeuchte in der Messkammer bewegen sich in einer ähnlichen Größenordnung wie auch in der normalen Umgebungsluft, so dass die Kalibrierung des Sensors vergleichsweise einfach ist. Der Wert, auf den die Luftfeuchte in der Messkammer durch den geregelten Zufluss von trockener Luft stabilisiert wird, ist im Prinzip frei wählbar. Ein übliches Verfahren ist, bei geöffneter Messkammer die Luftfeuchte der Umgebungsluft zu messen und diesen Wert dann als Zielwert bei der Messung mit dem Blatt einzustellen [46].

Schließlich besteht auch die Möglichkeit, nicht die Luftfeuchte in der Messkammer auf einen konstanten Wert zu stabilisieren, sondern die Durchflussrate der vorbeiströmenden Luft konstant zu halten. In diesem Fall wird die Feuchte der Luft gemessen, sowohl bevor sie in die Messkammer geleitet wird, als auch anschließend, wenn sie wieder herauskommt [46]. Dadurch, dass an beiden Stellen gemessen wird, ist für diesen Typ von Porometer keine getrocknete Luft erforderlich, sondern es kann auch einfach die Umgebungsluft mit ihrer gegebenen Luftfeuchte verwendet werden. Allerdings ist die Differenz der Luftfeuchte vor und nach dem Vorbeiströmen am Blatt vergleichsweise gering, so dass beide Werte sehr genau gemessen werden müssen. Aus diesem Grund sind Porometer, die nach diesem Prinzip arbeiten, technisch aufwendiger und teurer als die beiden zuerst genannten.

Das zuletzt genannte Messprinzip bietet jedoch den weiteren Vorteil, dass es sich um die Messung der Photosyntheseleistung erweitern lässt. Zu diesem Zweck wird neben der Luftfeuchte auch der CO_2 -Gehalt der Luft vor und nach dem Durchströmen der Messkammer gemessen [46, 48]. Dabei kann die Luft vor der Messung mit CO_2 angereichert werden, um während der Messung konstante Bedingungen herzustellen. Die technische Umsetzung der Messungen wird meist so gestaltet, dass nicht im selben Luftstrom vor und nach der Messkammer gemessen wird, sondern es wird von der Luft, die in die Messkammer einströmt, ein Referenzstrom abgezweigt, der parallel zum Luftstrom durch die Messkammer geführt wird und von dieser getrennt bleibt. Beide Teile des Luftstroms legen also auf dem Weg zum Sensor ähnliche Wege zurück, aber nur der Luftstrom durch die Messkammer kommt mit dem Blatt in Kontakt. So kann anhand der Differenz der Messwerte der Einfluss des Blattes bestimmt werden. Für eine ausreichend hohe Genauigkeit kommen sowohl für die Luftfeuchte als auch für den CO_2 -Gehalt Sensoren zum Einsatz, die auf Transmissionsmessungen bei bestimmten Infrarot-Wellenlängen basieren [46].

2.2.4. Infrarot-Reflektivität

Messungen der Infrarot-Reflektivität lassen sich mit passiven Detektionsverfahren umsetzen und eignet sich dadurch besonders auch für den Einsatz in der Fernerkundung, um große Flächen aus der Luft oder von Satelliten aus im Überblick zu betrachten. Eine Übersicht über die Auswirkungen verschiedener Wassergehalte auf die Reflektivität von Blättern im Wellenlängenbereich von 700 nm bis 2500 nm findet sich bei Tucker [49]. Hunt et al. [50, 51] kombinieren Reflektivitätsmessungen im nahen und mittleren Infrarotbereich mit Kalibrationsdaten zur Bestimmung des relativen Wassergehalts von Blättern

Zwei standardisierte Indizes zur Beurteilung von Vegetation im Infrarotbereich sind der NDVI und der NDWI. Der NDVI zielt darauf ab, allgemein grüne Vegetation zu detektieren, während der NDWI dafür ausgelegt ist, auch Unterschiede im Blattwassergehalt sensitiver zu detektieren. Die Grundidee hinter beiden Indizes ist, die Reflektivität für zwei verschiedene Wellenlängen bzw. Wellenlängenbereichen zueinander ins Verhältnis zu setzen. Dabei sollte die Reflektivität der untersuchten Blätter in einem der beiden Wellenlängenbereiche von der zu messenden Größe möglichst stark beeinflusst werden, während im anderen Wellenlängenbereich eine möglichst konstante und von der zu messenden Größe unabhängige Reflektivität vorliegen sollte.

Eine Definition des NDVI findet sich bei Tucker et al. [52, 53]:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Rot}}{\rho_{NIR} + \rho_{Rot}}$$

Dabei steht ρ_{NIR} für die Reflektivität im Nahinfrarotbereich und ρ_{Rot} für die Reflektivität im sichtbaren roten Bereich. Im Fall des Fernerkundungssatelliten Landsat 8 wird als roter Wellenlängenbereich das Intervall von 640-670nm detektiert und im Nahinfrarotbereich das Intervall von 850-880nm [54]. Im Fall der Fernerkundung ist die Strahlungsquelle, deren Licht reflektiert wird, die Sonne. Dementsprechend müssen die detektierten Werte für die Intensität unter Berücksichtigung des eingestrahnten Spektrums in Reflektivitätswerte umgerechnet werden [49]. Sichtbares rotes Licht wird von gesunder grüner Vegetation stark absorbiert und nur in geringem Umfang reflektiert. Im Gegensatz dazu weisen gesunde Blätter im Nahinfrarotbereich eine vergleichsweise hohe Reflektivität auf. Die starke Absorption im roten Spektralbereich ist auf das Chlorophyll zurückzuführen, das den Blättern ihre grüne Farbe gibt. Dementsprechend kann der NDVI auch als Maß für photosynthetische Aktivität aufgefasst werden. So ergeben sich für gesunde, grüne Pflanzen besonders hohe Werte für den NDVI und bei geringerer photosynthetischer Aktivität, die, wie in Abschnitt 2.1.4.2 dargestellt, früher oder später mit einem Abbau des Chlorophylls einhergeht, ergeben sich kleinere Werte für den NDVI. Viele andere Materialien wie Steine oder nackte Erde weisen in den beiden Spektralbereichen sehr ähnliche Reflektivitäten auf, so dass sich auch für Stellen, an denen sich gar keine Pflanze befindet, kleine Werte ergeben [55]. Ein Problem des NDVI besteht in der verschiedenen Eindringtiefe der beiden Spektralbereiche in die Vegetation [56]. Während die Reflexion bzw. Absorption des roten Bereichs direkt an der Oberfläche des ersten Blattes geschieht, dringt der Nahinfrarotbereich durch ungefähr acht Blattschichten. Dementsprechend ist die Annahme der Reflexion der beiden Wellenlängenbereiche an derselben Oberfläche nur näherungsweise zutreffend. Hinzu kommt, dass die detektierten Werte für den NDVI im Fall von besonders dichter Vegetation sättigen und so keine differenzierte Betrachtung mehr zulassen.

Diesen Problemen soll der von Gao [56] vorgestellte NDWI durch eine geänderte Wahl der untersuchten Wellenlängen entgegneten:

$$NDWI = \frac{\rho(860nm) - \rho(1240nm)}{\rho(860nm) + \rho(1240nm)}$$

Beide Wellenlängen liegen im Infrarotbereich und besitzen eine ähnliche Eindringtiefe und ähnliche Streueigenschaften in der Vegetation. Außerdem sind die beiden Wellenlängen so gewählt, dass der im Ergebnis für den NDWI ermittelte Wert in einem direkten Zusammenhang zum Wassergehalt der untersuchten Blätter steht. Die Reflektivität von flüssigem Wasser ist bei 1240nm etwas kleiner als bei 860nm. Das führt dazu, dass der NDWI im Fall von gut mit Wasser versorgten Blättern einen positiven Zahlenwert annimmt. Für trockene Blätter kehrt sich das Verhältnis um und der NDWI nimmt negative Werte an. Für nicht von Vegetation bedeckte Flächen ergeben sich auch größtenteils negative Werte. Durch die vergleichsweise große Eindringtiefe im Infrarotbereich geht nicht nur der Wassergehalt der obersten Blätter, sondern auch der der darunterliegenden Schichten in das Ergebnis der Messung mit ein. Diese Annahme konnte auch in Laborversuchen bestätigt werden.

Für Flächen, die vollständig mit Vegetation bedeckt sind, lässt sich eine Korrelation feststellen zwischen den Werten des NDWI und der äquivalenten Wasserdicke, die der auf der betrachteten Fläche insgesamt vorhandenen Wassermenge entspricht. Zusätzlich zu den genannten Vorteilen ist der NDWI weniger sensitiv gegenüber Streueffekten in der Atmosphäre als der NDVI [56]. Da die Information, die man aus dem Bereich um 680nm erhält, sich stark von der unterscheidet, die man aus dem Bereich um 1240nm bekommt, sollten der NDVI und der NDWI jedoch nicht als zueinander in Konkurrenz stehende Alternativen betrachtet werden, sondern als zwei sich gegenseitig ergänzende Verfahren.

Als eine alternative Definition für einen Wasserindex im Infrarotbereich wurde von Peñuelas et al. [57, 58] das Verhältnis der Reflektivitäten bei 900 nm und 970 nm vorgeschlagen:

$$WI = \frac{\rho(970 \text{ nm})}{\rho(900 \text{ nm})}$$

Auch hier basiert die Aussagekraft des Wasserindex darauf, dass Änderungen des Blattwassergehalts zu einer deutlich messbaren Änderung der Reflektivität bei 970 nm führen, während diese bei 900 nm näherungsweise konstant bleibt.

2.2.5. Einordnung der Messverfahren

Die Wahl eines geeigneten Messverfahrens in einer bestimmten Situation hängt einerseits davon ab, welche physiologische Größe betrachtet werden soll. Andererseits muss dabei auch berücksichtigt werden, welcher Grad an Invasivität akzeptabel ist und wie gut sich die Messungen automatisieren lassen, sofern die Messgröße über einen längeren Zeitraum kontinuierlich überwacht werden soll. Falls nur einzelne Messwerte benötigt werden, so dass die Messungen in Handarbeit ausgeführt werden können, und es akzeptabel ist, Blätter oder andere Pflanzenteile von der Pflanze abzutrennen, ist bei der Wahl der Messmethode die maximale Freiheit gegeben, so dass alle oben aufgeführten Messverfahren in Betracht kommen können. Sofern eine kontinuierliche Messwerterfassung gefordert ist, kommen Messungen des Wasserpotenzials mit einem Psychrometer oder der stomatären Leitfähigkeit mit einem Porometer in Frage. Dabei ist zu beachten, dass ersteres ein invasives Verfahren ist, bei dem das untersuchte Blatt verletzt wird, auch wenn dieses mit der Pflanze verbunden bleibt. Beim Einsatz eines Porometers bleibt das Blatt unverletzt, allerdings ist die stomatäre Leitfähigkeit vor allem ein Maß dafür, ob die Pflanze als Schutzreaktion bei Trockenstress ihre Stomata schließt. Wenn dies die gewünschte Information ist, ist das Porometer das Messgerät der Wahl. Eine Information über den Wassergehalt oder das Wasserpotenzial lässt sich damit jedoch nicht erhalten. Eine Messung des NDVI oder NDWI ist zerstörungsfrei und sogar aus der Ferne ohne mechanische Berührung der Pflanzen möglich. Diese Indizes sind allerdings eher als Kenngrößen zur ungefähren Einordnung des Zustands der Vegetation auf einer per Fernerkundung erfassten Fläche zu verstehen und weniger als exakte Messwerte des Blattwassergehalts.

Insgesamt kann man festhalten, dass die etablierten Messverfahren zur Erfassung des Wasserstatus von Pflanzen dazu in der Lage sind, einige verschiedene, physiologisch relevante Größen zu erfassen und sich so ein detailliertes Bild vom Zustand

der Pflanze erstellen lässt. Welche Messverfahren zur Anwendung kommen können, hängt dabei von den Gegebenheiten der konkreten Situation ab.

Unter den etablierten Messverfahren befindet sich allerdings noch keines, das auf direktem, aber nichtinvasivem Weg einen Messwert für den Wassergehalt eines Blattes liefert, so dass dieser kontinuierlich über einen längeren Zeitraum überwacht werden kann. Ein solches Verfahren stellt die THz-Spektroskopie dar, die in den folgenden Kapiteln zunächst als Technik vorgestellt werden soll, um anschließend ihren Einsatz zur Messung des Blattwassergehalts zu demonstrieren.

2.3. THz-Zeitbereichsspektroskopie

Die Angaben dazu, über welches Frequenzintervall sich der Terahertz-Frequenzbereich erstreckt, variieren zwischen verschiedenen Autoren [8, 10, 59–61]. Hier ist damit der Bereich von 0,1 THz bis 10 THz gemeint. Wie groß der Bereich ist, der in einem Experiment messtechnisch zugänglich ist, hängt vom verwendeten Versuchsaufbau ab. Die THz-Zeitbereichsspektroskopie (THz-TDS, engl. für „THz Time Domain Spectroscopy“) basiert auf kurzen elektromagnetischen Pulsen, die sich aus Frequenzkomponenten im THz-Frequenzbereich zusammensetzen. Bei der Detektion dieser Pulse wird deren Amplitude zeitaufgelöst und kohärent, d.h. mit festem Phasenbezug zum ausgesendeten Signal, erfasst [60, 62, 63].

Die THz-Zeitbereichsspektroskopie hat einige bemerkenswerte Eigenschaften, die teils auf den Frequenzbereich und teils auf die zeitaufgelöste Detektion zurückzuführen sind. Der THz-Frequenzbereich befindet sich im elektromagnetischen Spektrum zwischen dem Mikrowellen-Bereich und dem Infrarotlicht. Aus diesem Grund verhält sich Strahlung im THz-Frequenzbereich in mancherlei Hinsicht sehr ähnlich wie die langwelligere Mikrowellenstrahlung, während manche anderen Eigenschaften eher dem kurzwelligeren Infrarotbereich ähneln [64]. THz-Strahlung kann viele Materialien durchdringen, die im optischen Bereich des elektromagnetischen Spektrums undurchsichtig sind [65–68], wodurch sie sich für die Untersuchung von Materialeigenschaften, welche sich nicht allein aus einer optischen Betrachtung erschließen [69, 70], für den industriellen Einsatz im Bereich der Qualitätskontrolle [68, 71–81] und auch für Anwendungen im Sicherheitsbereich [64, 78] anbietet. Anders als etwa Röntgenstrahlung ist THz-Strahlung mit Photonenenergien im Bereich von wenigen Millielektronenvolt [60] aber nicht ionisierend, so dass bei ihrem Einsatz keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen nötig sind, was ihre Benutzung wesentlich unkomplizierter gestaltet. Die minimal erreichbare Fokusgröße ist zwar entsprechend der größeren Wellenlänge deutlich größer als bei sichtbarem oder infrarotem Licht, wodurch sich das laterale räumliche Auflösungsvermögen von bildgebenden Messungen entsprechend verringert [7, 8]. Andererseits ist das Auflösungsvermögen im THz-Bereich immer noch wesentlich größer als im Mikrowellenbereich. So kann der THz-Bereich als ein Kompromiss betrachtet werden aus einerseits der Fähigkeit viele Materialien zu durchdringen, die optisch undurchsichtig sind, und andererseits einem für viele Aufgaben ausreichenden räumlichen Auflösungsvermögen. Zur Strahlformung können nach nahezu denselben Prinzipien wie im optischen Bereich Linsen [82–87] und Spiegel [88–90] eingesetzt werden, so dass eine große Flexibilität bei der Gestaltung eines Versuchsaufbaus für eine bestimmte Messaufgabe besteht. Ein Material, das dabei oft zum Einsatz kommt, ist HDPE (engl. „High Density

Poly-Ethylene“), das über einen weiten Frequenzbereich einen nahezu konstanten Brechungsindex und eine vergleichsweise niedrige Absorption besitzt [67], aber auch verschiedene andere Polymere [84, 85, 91] und weitere Materialien wie hochresistives Silizium [66] besitzen geeignete Eigenschaften für die Herstellung von THz-Optiken. Andere Konzepte zur Formung und räumlichen Lenkung eines THz-Strahlengangs basieren auf Streu- und Beugungseffekten an Strukturen in der Größenordnung der verwendeten Wellenlängen [92–95]. Auch für Modulatoren [96–102], Filter [103–109] und Wellenleiter [110–119] im THz-Frequenzbereich existieren technische Konzepte. Durch die kohärente Detektion im Zeitbereich werden radarartige Messungen möglich, die auch in axialer Richtung eine räumliche Auflösung besitzen. Reflexionen des THz-Pulses an verschiedenen Schichten der Probe treffen zu verschiedenen Zeitpunkten beim Detektor ein, was im resultierenden Zeitbereichssignal direkt ablesbar ist. Andererseits kann das Signal durch eine Fouriertransformation vom Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert werden, so dass auch frequenz aufgelöste spektroskopische Messungen möglich sind. Auch im Frequenzbereich ist die kohärente Detektion von Vorteil, da so nicht nur die Amplitude, sondern auch die Phasenlage des detektierten Signals frequenz aufgelöst vorliegt. So kann neben den Absorptionseigenschaften einer Probe auch deren Brechungsindex direkt bestimmt werden, ohne auf eine indirekte und fehleranfällige Berechnung durch die Kramers-Kronig-Relation angewiesen zu sein [120].

Alle üblichen Bauweisen eines THz-Zeitbereichsspektrometers haben gemeinsam, dass für die Erzeugung und Detektion der THz-Pulse kurze Lichtpulse von etwa 100 fs Länge aus einem modengekoppelten Laser verwendet werden [60, 61, 121]. Bei Freistrahlaufbauten wird zu diesem Zweck oft ein Titan-Saphir-Laser [122, 123] verwendet, der bei einer Wellenlänge von ca. 800 nm emittiert. Die Modenkopplung wird in diesem Fall über den Kerr-Effekt im Titan-Saphir-Kristall realisiert. In fasergekoppelten Aufbauten kommen oft Faserlaser zum Einsatz, die bei einer Wellenlänge von 1550 nm arbeiten, welche auch in der Telekommunikation verwendet wird, wodurch eine breite Palette an Faserkomponenten für diese Wellenlänge kommerziell erhältlich ist. Als aktives Medium kommt in diesen Lasern eine Erbium-dotierte Glasfaser zum Einsatz. Für die Modenkopplung kann die in vielen Glasfasern auftretende nichtlineare Polarisationsdrehung genutzt werden, indem weitere polarisationsabhängige Elemente in den Strahlengang eingefügt werden, die in Kombination mit der Faser die Transmission von Lichtpulsen hoher Intensität begünstigen und kontinuierliche Laserstrahlung unterdrücken [124–126]. Neben diesen verbreiteten Bauweisen für modengekoppelte Laser existieren auch Ansätze dazu, mit Halbleiterlasern kurze Pulse zu erzeugen [127].

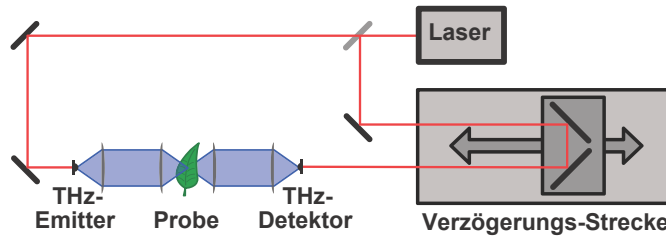
Für die eigentliche Erzeugung und Detektion von THz-Strahlung kommen oft photoleitende Antennen zum Einsatz. Auch möglich ist die Nutzung nichtlinearer Effekte in Kristallen wie z.B. LiNbO_3 , die auf der Emmitterseite einen Lichtpuls aus einem Laser durch die sogenannte optische Gleichrichtung in einen Puls im THz-Frequenzbereich umwandeln können, und am anderen Ende des Strahlengangs eine Detektion mittels des Prinzips der elektro-optischen Detektion ermöglichen [128]. Eine weitere Möglichkeit stellen starke Lichtpulse dar, welche in Luft ein Plasma erzeugen, das zur Erzeugung und Detektion von THz-Pulsen genutzt werden kann [129]. Es besteht auch die Möglichkeit, die verschiedenen Emitter- und Detektor-Bauformen untereinander zu kombinieren und z.B. einen Messaufbau mit einem

photoleitenden Emitter und einem elektro-optischen Detektor aufzubauen. In den Experimenten, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden, kommen photoleitende Antennen zum Einsatz, so dass im Folgenden der Schwerpunkt auf dieser Technik liegen wird.

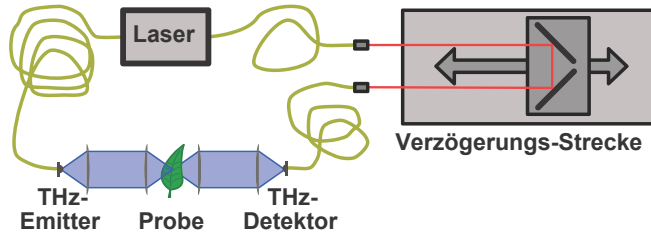
2.3.1. Photoleitende Antennen

Der grundsätzliche Aufbau einer photoleitenden Antenne besteht aus einem Halbleitersubstrat und einer darauf aufgetragenen Metallstruktur. Die genaue Form der Metallstruktur beeinflusst die Frequenzeigenschaften und das Abstrahlverhalten der Antenne [130, 131]. Um das Funktionsprinzip einer photoleitenden Antenne zu verstehen, reicht es jedoch aus, zunächst von einer einfachen Dipolstruktur auszugehen, also von einem kurzen, geraden Stück Leiterbahn, von beispielsweise $200\mu\text{m}$ Länge, das an beiden Enden von zwei weiteren orthogonal zur eigentlichen Antennenstruktur verlaufenden Streifenleitungen kontaktiert wird [66]. Eine wesentliche Eigenschaft einer photoleitenden Antenne ist eine Unterbrechung in der metallischen Antennenstruktur, die dazu führt, dass ohne optische Anregung des Halbleitersubstrats keine, bzw. nur eine sehr schlecht leitende Verbindung zwischen den beiden Teilen der Metallstruktur besteht. Die kurzen Lichtpulse aus dem modengekoppelten Laser werden an der Stelle der Unterbrechung in der Metallstruktur auf das Halbleitersubstrat fokussiert. Durch die optische Anregung werden im Halbleitermaterial Elektron-Loch-Paare mobilisiert. Solange diese als freie Ladungsträger bestehen, wird so die Unterbrechung in der Metallstruktur geschlossen und es besteht eine durchgehende leitende Verbindung. Sobald die optische Anregung endet und die Elektron-Loch-Paare rekombinieren, bricht diese Verbindung wieder zusammen. Auf der Emitter-Seite wird an die beiden Hälften der Antennenstruktur eine elektrische Spannung angelegt, die, solange die Antenne leitfähig ist, zu einem Stromfluss führt. Da dies wie beschrieben immer nur dann der Fall ist, wenn gerade ein Lichtpuls auf dem Halbleitersubstrat eintrifft, erhält man im Ergebnis einen Stromfluss durch die Antenne, der im Takt der Lichtpulse immer nur für einen kurzen Moment angeschaltet wird. Die Transiente dieses Stromflusses ist letztendlich für die Erzeugung des THz-Pulses verantwortlich [132].

Der THz-Puls breitet sich zunächst in Verlängerung des Strahlengangs der optischen Anregung durch das Halbleitersubstrat aus und wird auf der gegenüberliegenden Seite in den freien Raum bzw. in die Luft ausgekoppelt. Um die Verluste durch Totalreflexion an der Grenzfläche zwischen Halbleiter und Luft zu verringern, wird an dieser Stelle in der Regel eine halbkugelförmige Linse aus hochresistivem Silizium direkt auf die Grenzfläche aufgebracht [132]. Wenn eine photoleitende Antenne als Detektor zum Einsatz kommt, werden ebenfalls die Lichtpulse des modengekoppelten Lasers auf die Unterbrechung in der Metallstruktur fokussiert. Der Strahlengang aus dem Laser wird also über einen Strahlteiler zweigeteilt, um beide Antennen zugleich anregen zu können. An die Detektorantenne wird keine Spannung angelegt, sondern es wird der vom elektrischen Feld eines dort eintreffenden THz-Puls induzierte Stromfluss durch die Antenne gemessen [60]. Damit dies möglich ist, müssen bei der Detektor-Antenne der THz-Puls und der Lichtpuls gleichzeitig ankommen. Allerdings ist in diesem Zusammenhang wegen der gegenüber der optischen Anregung größeren zeitlichen Länge des THz-Pulses „gleichzeitig“ ein



(a) Strahlführung als Freistrah-Aufbau



(b) Teilweise Fasergekoppelt

Abbildung 2.1.: Schematische Darstellung des Funktionsprinzips eines THz-Zeitbereichsspektrometers. Die optische Strahlführung des Laserlichts kann sowohl als Freistrah-Aufbau als auch fasergekoppelt realisiert werden. Elektrische Leitungen sind in der Übersicht halber nicht in den Skizzen enthalten.

ungenauer Begriff. Dieser Umstand wird im Folgenden bei der Beschreibung eines THz-Zeitbereichsspektrometers als Gesamtsystem nochmals zur Sprache kommen.

2.3.2. Integration zu einem Gesamtsystem

Die photoleitenden Antennen und der ebenfalls schon erwähnte modengekoppelte Kurzpuls laser stellen zwar die zentralen Komponenten dar, die zu einem Großteil die Charakteristik eines THz-Zeitbereichsspektrometers bestimmen, jedoch sind noch einige weitere Komponenten notwendig, um ein funktionierendes Messsystem zu erhalten. Um den Zeitversatz, mit dem die Lichtpulse bei den beiden Antennen eintreffen, einstellen zu können, wird eine Verzögerungsstrecke benötigt. Die Datenerfassung auf der Seite der Detektorantenne geschieht üblicherweise durch einen Lock-In-Verstärker. Das Zusammenspiel der verschiedenen Komponenten wird von einem Computer gesteuert.

Eine etablierte Technik zum Aufbau der Verzögerungsstrecke stellt die Kombination aus einer mechanischen Linearverfahreinheit und einem Retroreflektor dar [60]. Bei korrekter Justage kann durch die Position des Retroreflektors auf der Linearverfahreinheit die optische Weglänge und damit die Laufzeit der Lichtpulse verändert werden, ohne dass sich andere Eigenschaften des Strahlengangs nennenswert ändern. Diese Art von Aufbau ist schematisch in Abb. 2.1 dargestellt. Die Verzögerungsstrecke kann prinzipiell sowohl in den optischen Pfad zur Emitter- als auch zur Detektorantenne eingefügt werden. Da es bei der Messung nur auf den Zeitversatz zwischen den beiden Antennen ankommt, sind beide Möglichkeiten äquivalent, so dass es ausreicht, im Folgenden den Fall der Verzögerungsstrecke im Strahlengang

zur Detektorantenne zu betrachten. In diesem Fall kann der Zeitpunkt, zu dem mit der Repetitionsrate des Lasers THz-Pulse von der Emitter-Antenne ausgesendet werden, als konstant betrachtet werden. Der Zeitpunkt, zu dem die Lichtpulse bei der Detektorantenne ankommen, kann über die Verzögerungsstrecke variiert werden. Damit der THz-Puls und der Lichtpuls bei der Detektorantenne gleichzeitig ankommen, muss ausgehend vom Strahlteiler der optische Weg bis zur Detektorantenne der Summe aus dem optischen Weg zur Emitter-Antenne und dem THz-Pfad zwischen den beiden Antennen entsprechen. Allerdings wird für eine Messung, welche die THz-Wellenform im Zeitbereich erfasst, die Zeitverzögerung nicht auf einen einzigen festen Wert eingestellt, sondern es wird mittels der Verzögerungsstrecke ein Zeitfenster abgefahren, das eine Länge von bis zu einigen hundert Picosekunden haben kann. In diesem Zeitfenster wird in äquidistanten Zeitabständen der in der Detektor-Antenne induzierte Strom als Messwert erfasst. Aufgrund der Repetitionsrate des Lasers im Megahertzbereich ergibt sich der gemessene Strom nicht aus dem elektrischen Feld eines einzelnen THz-Pulses, sondern als zeitlicher Mittelwert über viele Pulse. Mathematisch gesehen erhält man so die Faltung aus dem bei der Detektor-Antenne ankommenden elektrischen Feld des sich immer wieder in identischer Weise wiederholenden THz-Pulses und der durch die optische Anregung hervorgerufenen Leitfähigkeit der Detektor-Antenne, deren Zeitpunkt schrittweise über die THz-Wellenform hinweggeschoben wird [60]:

$$J(t) \propto \int_{-\infty}^{\infty} E_{THz}(\tau)g(t - \tau)d\tau \quad (2.3)$$

Aus diesem Zusammenhang folgt, dass eine direkte Proportionalität zwischen dem gemessenen Photostrom und der Feldstärke des THz-Pulses zu einem bestimmten Zeitpunkt nur dann vorliegt, wenn der zeitliche Verlauf der Leitfähigkeit $g(t - \tau)$, der von der Form des anregenden Lichtpulses und der Frequenzantwort der optisch angeregten Ladungsträger bestimmt wird, einem Dirac'schen Delta-Puls möglichst nahe kommt, also einen möglichst kurzen Zeitraum abdeckt. Auch im Frequenzbereich liegt dann eine direkte Proportionalität in der Form $J(\omega) \propto E_{THz}(\omega)$ nur in diesem Fall vor. Diesem Verhalten kann man sich durch möglichst kurze Lichtpulse zur Anregung und durch eine schnelle Rekombinationszeit des Halbleitersubstrats annähern. Da beidem jedoch Grenzen gesetzt sind, hat die Anregung der Detektor-Antenne in der Realität eine endliche zeitliche Ausdehnung, so dass der detektierte Strom eine Frequenzabhängigkeit erhält [60]:

$$J(\omega) \propto I(\omega)R(\omega)E_{THz}(\omega)$$

Dabei ist $I(\omega)$ das Spektrum des Lichtpulses und $R(\omega)$ ist die Frequenzantwort der optisch angeregten Ladungsträger in der Detektorantenne. Diese Art der Detektion wirkt letztendlich wie ein Tiefpass-Filter, der die Bandbreite des detektierten Signals beschränkt.

Im einfachsten Fall wird das äquidistante Zeitraster, in dem die Messwerte erfasst werden, mit der Verzögerungsstrecke schrittweise abgefahren, wobei die Bewegung der Verzögerungsstrecke nach jedem Schritt für die eigentliche Messung angehalten wird. Eine technisch etwas aufwendigere, aber wesentlich schnellere Möglichkeit der Messwerterfassung besteht darin, dass die Verzögerungsstrecke das komplette Zeitfenster ohne anzuhalten mit einer konstanten Geschwindigkeit durchfährt und

dabei ein Trigger-Signal generiert, welches dem äquidistanten Raster entsprechend signalisiert, wann die Erfassung der einzelnen Messwerte erfolgen soll. Im Fall der Messwerterfassung durch einen digitalen Lock-In-Verstärker wird diesem dieses Triggersignal also vom Steuergerät der Verzögerungsstrecke zugespielt. Die Verwendung eines Lock-In-Verstärkers setzt die Modulation des zu messenden Signals mit einer dem Verstärker bekannten Frequenz und Phase voraus. Zur Modulation des von der Emitter-Antenne ausgesendeten Signals kann entweder der optischen Anregung der Antenne durch ein mechanisches „Zerhacker-Rad“ eine Referenzfrequenz im Bereich von einigen Kilohertz aufgeprägt werden, oder die elektrische Vorspannung der Emitter-Antenne wird mit einer entsprechenden Frequenz moduliert. In letzterem Fall kann die Vorspannung der Emitter-Antenne sowohl als rechtecks- als auch als sinusförmige Wechselspannung ausgeführt werden. Sowohl im Fall der optischen als auch der elektrischen Modulation wird das modulierte Signal neben der Emitter-Antenne auch dem Referenz-Kanal des Lock-In-Verstärkers zugeführt. Im Fall einer kontinuierlichen Bewegung der Verzögerungsstrecke wirkt zusätzlich zu den oben beschriebenen Eigenschaften des Detektionsprinzips auch der Lock-In-Verstärker als Tiefpass-Filter für die aufgezeichnete THz-Wellenform. Die Charakteristik dieses Filters ergibt sich aus der Integrationszeit des Lock-In-Verstärkers und der Fahrtgeschwindigkeit der Verzögerungsstrecke. Es ist dabei zweckmäßig, die Geschwindigkeit der Verzögerungsstrecke bezogen auf die Änderung der Zeitverzögerung in Picosekunden pro Sekunde (ps/s) anzugeben, auch wenn die Geschwindigkeit ihrer Bewegung tatsächlich wie jede mechanische Bewegung die Einheit (Milli-)Meter pro Sekunde besitzt. Die Integrationszeit des Lock-In-Verstärkers kann auch als die Zeitkonstante eines Tiefpass-Filters aufgefasst werden. Aus dieser errechnet sich mit der Fahrtgeschwindigkeit der Verzögerungsstrecke eine effektive Zeitkonstante für die Filterwirkung auf das THz-Signal:

$$\tau_{THz} = v_{stage} \cdot \tau_{LockIn}$$

Aus dieser Zeitkonstante ergibt sich als Grenzfrequenz [133, Kap. 10] für das THz-Signal:

$$f_{max} = (2\pi\tau_{THz})^{-1} = (2\pi v_{stage}\tau_{LockIn})^{-1}$$

Bei einer Fahrtgeschwindigkeit der Verzögerungsstrecke von $v_{stage} = 2$ ps/s und einer Integrationszeit von $\tau_{LockIn} = 10$ ms ergibt sich so z.B. eine Grenzfrequenz von knapp unter 8 THz.

Die Beschreibung des Messsystems geht bisher von einem fest auf einem optischen Tisch aufgebauten Versuchsaufbau mit über Spiegel geführten optischen Freistrahlf Strecken des anregenden Laserlichts aus. Es ist allerdings auch möglich und für viele Messaufgaben sehr zweckmäßig, die optischen Pfade oder zumindest Teile davon in Glasfasern zu führen [134]. Insbesondere die Anbindung der beiden Antennen kann im Fall eines fasergekoppelten Aufbaus wesentlich flexibler ausgeführt werden, was besonders dann von Vorteil ist, wenn diese während des Experiments bewegt werden sollen. Für einen solchen Aufbau werden an die Wellenlänge des Lasers angepasste Single-Mode-Glasfasern verwendet. Oft sind diese Glasfasern zudem polarisations-erhaltend, wodurch die Ausrichtung des linear polarisierten Laserlichts mit Bezug zu den Antennen konstant gehalten wird und so mechanische Einflüsse auf die optischen Eigenschaften der Fasern verringert werden. Allerdings ist die Dispersion des

Licht in meterlangen Glasfasern nicht zu vernachlässigen und würde ohne Kompensation zu einer zeitlichen Verbreiterung der Laserpulse führen, die keinen sinnvollen Betrieb des THz-Spektrometers mehr zulässt. Die aus diesem Grund den Glasfasern vorgeschaltete Dispersionskompensation kann in Form von Glasfasern mit inverser Dispersion realisiert werden [134]. Die tatsächliche Faserlänge wird durch die Vorkompensation also noch verlängert, im Ergebnis heben sich die Effekte der Faser mit inverser Dispersion, die im Falle eines Faserlasers üblicherweise direkt in dessen Gehäuse integriert wird, und der im Versuchsaufbau verwendeten Glasfasern gegenseitig auf, so dass im Ergebnis die Lichtpulse in ihrer ursprünglichen Form bei den Antennen ankommen. Die Länge der in einem Versuchsaufbau eingesetzten Glasfasern wird also durch die Auslegung der Dispersionskompensation festgelegt und kann nicht ohne weiteres geändert werden. Ein Effekt, der beim Einsatz von Glasfasern in einem Messsystem bedacht werden sollte, ist außerdem die Temperaturabhängigkeit von deren optischen Eigenschaften. Wie Soltani et al. [135] gezeigt haben, kann vor allem die Phasenstabilität der Messungen durch Temperaturschwankungen beeinträchtigt werden. Die Nützlichkeit eines fasergekoppelten Aufbaus bleibt, sofern man diese Einschränkung beachtet, für zahlreiche Anwendungen nichtsdestotrotz bestehen.

2.3.3. Alternative Verzögerungskonzepte

Neben dem oben beschriebenen Aufbau eines THz-Zeitbereichsspektrometers mit einer mechanischen Verzögerungsstrecke mit einer Linearverfahreinheit existieren auch verschiedene alternative Verzögerungskonzepte, die darauf abzielen die Geschwindigkeit der Messdatenerfassung zu erhöhen. Ein solcher Ansatz besteht darin, den auf der Verzögerungsstrecke eingesetzten Retroreflektor auf einem sogenannten Shaker zu montieren, der in seinem Aufbau einem Lautsprecher ähnelt [8]. An Stelle einer Lautsprechermembran wird aber der Retroreflektor schnell vor- und zurückbewegt. Die Bewegung des Retroreflektors besitzt dabei ein nicht-lineares Geschwindigkeitsprofil, so dass die resultierende Zeitachse der aufgezeichneten THz-Wellenform zunächst linearisiert werden muss, um eine sinnvolle Auswertung zu ermöglichen.

In einem fasergekoppelten THz-Zeitbereichsspektrometer besteht durch den Einsatz eines Faserstreckers die Möglichkeit, die Verzögerungseinheit komplett fasergeführt aufzubauen [136]. In einem solchen wird eine aufgewickelte Glasfaser periodisch gestreckt und entspannt, wodurch sich die optische Weglänge durch die Faser entsprechend ändert. Dies kann durch eine von einem Elektromotor angetriebene Mechanik geschehen oder durch zylinderförmige Piezoelemente, um welche die Faser gewickelt wird. Um die Streckung der optischen Weglänge zu erfassen und so eine korrekte Zeitachse für die THz-Wellenform zu erhalten, wird über einen wellenlängenabhängigen Multiplexer (WDM, engl. für Wavelength Division Multiplexer) zusätzlich zu den für das Spektrometer genutzten Lichtpulsen ein zweiter Laser in die Faser eingekoppelt, welcher bei einer separaten Wellenlänge kontinuierlich emittiert. Nach dem Durchlaufen der gestreckten Faser wird das Licht beider Laser über einen zweiten WDM wieder voneinander getrennt. So kann mit Hilfe des zweiten Lasers die Änderung der optischen Weglänge interferometrisch bestimmt werden.

Die beiden miteinander verwandten Verzögerungskonzepte der asynchronen optischen Abtastung [137–141] (ASOPS, engl. für Asynchronous Optical Sampling)

und der elektronisch gesteuerten optischen Abtastung [142, 143] (ECOPS, engl. für Electronically Controlled Optical Sampling) kommen beide komplett ohne mechanische Weglängenänderung aus. Stattdessen werden zwei Laser in ihrer Repetitionsrate so miteinander synchronisiert, dass zwischen den von den beiden Lasern emittierten Lichtpulsen effektiv der gewünschte Zeitversatz entsteht. Im Fall von ASOPS werden beide Laser auf zwei leicht voneinander abweichende Repetitionsraten stabilisiert, so dass sich der effektive Zeitversatz zwischen den Pulsen der beiden Laser von Puls zu Puls leicht verschiebt. Die Länge des durchfahrenen Zeitfensters folgt dabei direkt aus der Repetitionsrate der beiden Laser, so dass z.B. bei einer Repetitionsrate von 250 MHz ein Zeitfenster von 4 ns abgedeckt wird. Wie schnell das Zeitfenster durchfahren wird, hängt von der Differenz der beiden Repetitionsraten ab, die sich im Kilohertz-Bereich bewegt. Im Fall von ECOPS werden die Repetitionsraten der beiden Laser nicht auf feste Werte stabilisiert, sondern aktiv so geregelt, dass der Zeitversatz zwischen beiden Lasern ein einstellbares Zeitfenster durchläuft. Gegenüber dem festen Zeitfenster bei ASOPS werden so Totzeiten vermieden, die sonst auftreten, wenn nicht dessen voller Umfang benötigt wird. Eine Technik, die eine gewisse Ähnlichkeit mit ASOPS und ECOPS besitzt, aber mit einem einzelnen Laser auskommt, stellt die optische Abtastung durch Verstimmung der Laserkavität dar [144] (OSCAT, engl. für Optical Sampling by CAvity Tuning). Auch diese Technik basiert auf der Änderung der Repetitionsrate des Lasers. Diese wird in reproduzierbarer Weise periodisch variiert. Der optische Weg zu den beiden Antennen wird durch zwei unterschiedlich lange Glasfasern geführt. Bei den Antennen kommt auf diese Weise die Änderung der Repetitionsrate mit unterschiedlicher Zeitverzögerung an, was effektiv auch hier einen sich periodisch ändernden Zeitversatz erzeugt.

Die verschiedenen schnellen Verzögerungskonzepte haben gemeinsam, dass aufgrund ihrer Wiederholrate der Abtastung der THz-Wellenform im Bereich von einigen Hertz bis einigen Kilohertz der Einsatz eines Lock-In-Verstärkers in der Regel nicht mehr praktikabel ist. Stattdessen wird der in der Detektorantenne induzierte Strom über einen Transimpedanzverstärker direkt gemessen. Zur Erhöhung des Signal-zu-Rausch-Abstands werden ggf. mehrere direkt hintereinander aufgezeichnete THz-Wellenformen zur Mittelwertbildung herangezogen.

2.3.4. Datenauswertung

Ein grundlegendes Prinzip, das bei der Auswertung von Messdaten aus einem THz-Zeitbereichsspektrometer so gut wie immer zur Anwendung kommt, ist der Vergleich zwischen der eigentlichen Messung mit der untersuchten Probe und einer Referenzmessung. Die Referenzmessung wird dabei mit demselben Versuchsaufbau in identischer Konfiguration aufgenommen mit dem einzigen Unterschied, dass sich keine Probe im THz-Strahlengang befindet. Alle Unterschiede in Amplitude und Phase zwischen der Referenz- und der Probe-Messung werden also durch die Anwesenheit der Probe im THz-Strahlengang verursacht. Eine primitive, aber manchmal schon ausreichende Form der Datenauswertung stellt die Verwendung der Spitze-Spitze-Werte der aufgezeichneten Wellenformen dar, um die Größe der transmittierten Signalamplitude zu berechnen:

$$t_{ss} = \frac{\max I_{Probe}(t) - \min I_{Probe}(t)}{\max I_{Referenz}(t) - \min I_{Referenz}(t)}$$

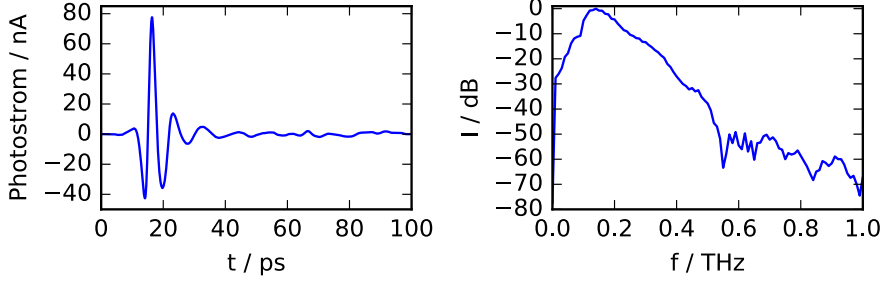


Abbildung 2.2.: Beispiel für einen mit einem THz-Zeitbereichsspektrometer aufgenommenen THz-Puls und die Darstellung des Signals im Frequenzbereich.

Dabei sind $I_{Probe}(t)$ und $I_{Referenz}(t)$ die bei der Probe- bzw. Referenzmessung aufgezeichneten Werte für den in der Detektor-Antenne induzierten Photostrom. Die Größe des Photostroms kann von verschiedenen Faktoren beeinflusst werden, wie z.B. der bei den Antennen ankommenden optischen Leistung des Lasers oder die Größe der Vorspannung an der Emitter-Antenne. Diese Faktoren haben offensichtlich nichts mit der untersuchten Probe zu tun und sollten somit keinen Einfluss auf das Ergebnis der Messung haben. Diese Forderung ist erfüllt, da sich diese Einflüsse auf die Probe- und die Referenzmessung in gleicher Weise auswirken und sich bei der Normierung der Probemessung durch die Referenzmessung gegeneinander aufheben. In dieser Art der Auswertung wird einzig die maximale Auslenkung der Signalamplitude berücksichtigt, jedoch werden der durch die Probe verursachte Zeitversatz und die Frequenzabhängigkeit des Signals ignoriert.

Für eine frequenzabhängige Auswertung werden die im Zeitbereich aufgezeichneten Daten durch eine Fouriertransformation in den Frequenzbereich transformiert. Aus [145, Gl. 2.10] folgt:

$$A_k(f) = \int_{-\infty}^{\infty} I_k(t) e^{-i2\pi ft} dt, \quad k = \text{Probe, Referenz}$$

Beziehungsweise, da die Messdaten auf einem diskreten Zeitraster vorliegen in Form einer diskreten Fouriertransformation (DFT) folgt aus [145, Gl. 4.12]:

$$A_k(f) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} I_k(t_j) e^{-i2\pi f t_j}, \quad k = \text{Probe, Referenz}$$

$\{t_j, j \in \mathbb{N} | t_0 < t_1 < \dots < t_n, t_{j+1} - t_j = \Delta t\}$ definiert dabei das äquidistante Zeitraster und die darstellbaren Frequenzen sind $\{f_m = \frac{m}{n\Delta t}, m \in \mathbb{N} | 0 \leq m \leq n/2\}$. Für die Berechnung ist es von Vorteil, als Spezialfall der diskreten Fouriertransformation die schnelle Fouriertransformation (FFT) zu verwenden für die als zusätzliche Bedingung gilt $n = 2^m, m \in \mathbb{N}$. Ein Beispiel für einen THz-Puls und dessen Darstellung im Frequenzbereich nach der Fouriertransformation findet sich in Abb. 2.2.

Eine Eigenschaft der Fouriertransformation eines Signals von endlicher Länge ist, dass die auf die Daten im Zeitbereich angewendete Fensterfunktion sich ebenfalls im Ergebnis im Frequenzbereich wiederfindet. Wenn keine Fensterfunktion explizit auf die Daten angewendet wird, entspricht dies einer rechteckigen Fensterfunktion,

2. Grundlagen

die im Vergleich mit anderen Fensterfunktionen unnötig viele Frequenzkomponenten enthält, die das Ergebnis der Fouriertransformation potenziell verfälschen können. Fensterfunktionen, die diesen Einfluss abmildern, sind beispielsweise, das Hamming-, Hanning-, oder Blackman-Fenster [145, Kap. 3].

Eine weitere Vorbehandlung der Zeitbereichsdaten betrifft einen eventuell vorhandenen Gleichspannungs-Offset, der vor der Anwendung der Fouriertransformation entfernt werden sollte. Sofern kein Offset vorhanden ist, sollte eine Mittelwertbildung über die komplette Wellenform Null ergeben. Diese Eigenschaft lässt sich zum Entfernen des Offset verwenden:

$$I_k(t) = I_{k,roh}(t) - \langle I_{k,roh}(t) \rangle, \quad k = \text{Probe, Referenz}$$

Aus der Fouriertransformation der Wellenformen von Probe- und Referenzmessung kann die Übertragungsfunktion berechnet werden, die den Einfluss der Probe auf das THz-Signal beschreibt [60]:

$$H(f) = \frac{A_{Probe}(f)}{A_{Referenz}(f)} \quad (2.4)$$

$H(f)$ nimmt im Allgemeinen komplexe Werte an. Dabei wird das Verhältnis der Signalamplitude zwischen Probe- und Referenzmessung beschrieben durch

$$t(f) = |H(f)| \quad (2.5)$$

und der von der Probe verursachte Phasenversatz wird durch den Phasenwinkel der komplexen Übertragungsfunktion beschrieben:

$$\phi(f) = \angle H(f)$$

Der Phasenversatz resultiert aus dem durch die Probe verursachten Zeitversatz des Signals. Dabei ist zu beachten, dass der durch die Fouriertransformation bestimmte Phasenversatz nur bis auf einen Offset um beliebige Vielfache von 2π eindeutig ist, auch wenn eine entsprechend dicke Probe ohne weiteres auch einen größeren Phasenversatz als 2π verursachen kann.

Der absolute Zeitversatz des Signals ergibt sich aus der Dicke der Probe und deren Brechungsindex. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass man, falls man die Dicke der Probe kennt, ihren Brechungsindex bestimmen kann. Die experimentell bestimmte Übertragungsfunktion $H(f)$ kann mathematisch in dieser Form beschrieben werden [60]:

$$H(f) = t_{12}(f)t_{23}(f)e^{-\alpha(f)d/2}e^{i(n(f)-1)2\pi fd/c}$$

Dabei sind $t_{12}(f)$ und $t_{23}(f)$ die Fresnelschen Transmissionskoeffizienten durch die beiden Oberflächen der Probe, $\alpha(f)$ ist der Absorptionskoeffizient des Probenmaterials und $n(f)$ dessen Brechungsindex. Unter der Annahme, dass diese Größen alle reellwertig sind, lassen sich für den Brechungsindex und den Absorptionskoeffizienten die folgenden Ausdrücke finden [60]:

$$n(f) = 1 + \frac{\phi(f)c}{2\pi fd}$$

$$\alpha(f) = -\frac{2}{d} \ln \left(\frac{(n(f) + 1)^2}{4n(f)} t(f) \right)$$

Diese Formulierung hat den Vorteil, dass die Werte für $n(f)$ und $\alpha(f)$ auf direktem Weg aus dem Ergebnis der Messung errechnet werden können. Ihre Schwächen liegen einerseits darin, dass bei realen Proben die Fresnelschen Transmissionskoeffizienten einen Imaginärteil haben, der zu einem zusätzlichen Phasenversatz führt, der hier aber nicht berücksichtigt wird. Andererseits geht diese Formulierung von einem THz-Puls aus, der genau einmal durch die Probe transmittiert wird, während in der Realität der THz-Puls an den Oberflächen der Probe mehrfach hin und her reflektiert wird und diese Reflexionen dem direkt transmittierten Puls wie Echos nachfolgen. Je nach Dicke der Probe können diese Echopulse im Zeitbereich klar voneinander getrennt auftreten oder bei einer sehr dünnen Probe sich mit dem direkt transmittierten Puls teilweise überlagern. Im Fall einer klaren zeitlichen Trennung ließe sich eine Verfälschung des Auswertungsergebnisses durch die Echopulse vermeiden, indem die Zeitbereichsdaten noch vor dem ersten Echopuls abgeschnitten werden. Tatsächlich lässt sich der Informationsgehalt der Echopulse aber für die Datenauswertung nutzen und kann sogar dazu beitragen, die Dicke der Probe ausgehend von einer ungefähren Schätzung genauer zu bestimmen [146–148]. Bei der Auswertung im Frequenzbereich wird dazu die theoretische Übertragungsfunktion so formuliert, dass die Reflexionen innerhalb der Probe und damit die Echopulse mit berücksichtigt werden. Zur besseren Lesbarkeit wird die Frequenzabhängigkeit von $n(f)$ und $\alpha(f)$ im Folgenden implizit angenommen, aber nicht mehr durch die Formelschreibweise symbolisiert. Der Ausdruck

$$H(f) = \frac{4n}{(n+1)^2} e^{-\alpha d/2} e^{i2\pi f d(\Re(n)-1)/c} FP(f) \quad (2.6)$$

mit

$$FP(f) = \sum_{k=0}^{\infty} \left(\left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 e^{-\alpha d} e^{4\pi i \Re(n) f d/c} \right)^k = \left(1 - \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2 e^{-\alpha d} e^{4\pi i \Re(n) f d/c} \right)^{-1}$$

beschreibt die Übertragungsfunktion inklusive der Echopulse, wobei deren Einfluss durch $FP(f)$ dargestellt wird. Diese Darstellung findet sich in äquivalenter Weise sowohl bei Duvillaret et al. [148] als auch bei Pupeza et al. [120], wobei hier allerdings vereinfachend für den Brechungsindex von Luft ein Wert von 1 angenommen wird. Die Summenschreibweise beschreibt anschaulich die Überlagerung der einzelnen Echos. Unter der Annahme einer unendlichen Anzahl von Echos lässt sich der Satz der Geometrischen Reihe [149] anwenden, was schließlich zu einem geschlossenen Ausdruck für $FP(f)$ führt. Durch iterative Optimierungsverfahren lässt sich diese theoretische Übertragungsfunktion an die gemessene anpassen, wobei auch die Dicke der Probe Teil der bei der Anpassung gesuchten Parameter ist. Diese Art der Datenauswertung wurde zuerst von Duvillaret et al. [148] demonstriert und anschließend von Pupeza et al. [120] und Scheller et al. [146, 147] weiterentwickelt. Die Bestimmung der Probendicke basiert dabei auf dem Effekt, dass, falls bei der Auswertung ein falscher Wert für die Dicke angenommen wird, auf dem Ergebnis für den Brechungsindex und die Absorption Oszillationen sichtbar werden, welche

bei einer Auswertung unter Annahme der korrekten Dicke verschwinden. Der Optimierungsprozess für die Dickenbestimmung besteht also darin, diese Oszillationen zu minimieren. Dies kann wie von Pupeza et. al [120] vorgeschlagen durch eine Minimierung der totalen Variation von n und α geschehen, oder wie von Scheller et al. demonstriert durch eine zusätzliche Fouriertransformation in einen Quasi-Raum verlagert werden, in dem entsprechend der Oszillation Peaks auftreten, deren Minimierung angestrebt wird [147].

Für die Bestimmung des Brechungsindex und des Absorptionskoeffizienten einer in einer Transmissionsmessung untersuchten Probe stellt diese Art der Datenauswertung ein bewährtes Verfahren dar. Eine wichtige Voraussetzung für die Anwendbarkeit dieses Verfahrens ist allerdings, dass die Oberflächen der Probe glatt sind und parallel zueinander stehen, so dass die Echos in der erwarteten Art und Weise reflektiert werden. Wenn dies nicht der Fall ist, muss die Auswertung an die jeweilige Situation angepasst werden, um z.B. die Rauigkeit der Probenoberfläche mit zu berücksichtigen.

2.4. Photomischung und THz-Quasi-Zeitbereichsspektroskopie

Zur Erzeugung von Strahlung im THz-Frequenzbereich kann an Stelle von kurzen Lichtpulsen auch kontinuierliches Laserlicht verwendet werden [150]. Die Funktionsweise eines solchen THz-Systems ist am leichtesten zu verstehen, wenn man zunächst von einem Photomischsystem mit zwei Lasern ausgeht, die jeweils auf eine einzelne Wellenlänge stabilisiert werden. Das von beiden Lasern emittierte Licht wird überlagert und nimmt dann als kombinierter Strahl zu den beiden Antennen denselben Weg wie oben für die THz-Zeitbereichsspektroskopie beschrieben, d.h. das Licht wird über einen Strahlteiler aufgeteilt und bis auf einen einstellbaren Zeitversatz wird beiden Antennen dasselbe optische Signal zugeführt. Durch die Überlagerung der beiden Laserstrahlen entsteht eine Schwebung deren Frequenz der Differenz der Frequenzen der beiden Laser entspricht. Wenn man aus den beiden sich überlagernden elektromagnetischen Feldern der beiden Laserstrahlen die optische Leistung berechnet, stellt sich der Zusammenhang folgendermaßen dar [151]:

$$\begin{aligned} P_{Opt}(t) &\propto (E_1 \sin(\omega_1 t + \phi_1) + E_2 \sin(\omega_2 t + \phi_2))^2 \\ &= E_1^2 \sin^2(\omega_1 t + \phi_1) + E_2^2 \sin^2(\omega_2 t + \phi_2) \\ &\quad - \frac{1}{2} \cos((\omega_1 + \omega_2)t + \phi_1 + \phi_2) + \frac{1}{2} \cos((\omega_1 - \omega_2)t + \phi_1 - \phi_2) \end{aligned}$$

Entscheidend für die Erzeugung von THz-Strahlung ist in dieser Darstellung der letzte Summand, der die Schwebung mit der Differenz der beiden Frequenzen darstellt. Aufgrund der Ladungsträgerlebensdauer im Halbleitermaterial der Antennen können diese mit ihrer Leitfähigkeit nicht den Frequenzen der ersten drei Summanden folgen. Durch diese Tiefpasswirkung bleibt für die Erzeugung der THz-Strahlung die im letzten Summanden dargestellte Differenzfrequenz übrig. In einem mit kurzen Pulsen betriebenen THz-Zeitbereichsspektrometer ist die Ladungsträgerlebensdauer auf der Emitter-Seite weniger kritisch, da zwischen den Pulsen genug Zeit bleibt für

das Rekombinieren der Ladungsträger. Bei kontinuierlicher Anregung müssen die Ladungsträger jedoch so schnell rekombinieren, dass die Leitfähigkeit der schnellen Änderung der anregenden optischen Leistung möglichst direkt folgen kann. An die Emitter-Antenne ist auch hier eine Vorspannung angelegt, die zu einem zur Leitfähigkeit proportionalen Stromfluss führt, dessen Änderung wiederum das elektromagnetische Feld der letztendlich ausgesendeten THz-Strahlung erzeugt [151]:

$$E_{THz}(t) \propto \frac{\partial}{\partial t} I_E(t) \propto \frac{\partial}{\partial t} g_E(t) \propto \frac{\partial}{\partial t} n_E(t, P_{Opt}(t))$$

Auf der Seite der Detektorantenne stellt sich die Situation ähnlich dar. Die Leitfähigkeit der Detektor-Antenne wird bis auf einen Zeitversatz in derselben Art und Weise moduliert wie die der Emitter-Antenne. Der in der Detektor-Antenne induzierte Strom ergibt sich wie auch schon in Gl. 2.3 aus dem Produkt der Leitfähigkeit und des im selben Moment dort vorhandenen elektrischen Feldes der THz-Strahlung¹.

$$I_D(t) \propto \int_{-\infty}^{\infty} E_{THz}(t) g(t - \tau) d\tau \quad (2.7)$$

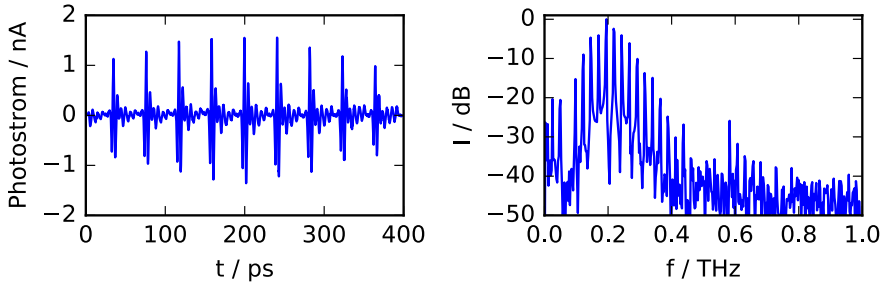
Das Prinzip der Detektion gleicht also dem in einem THz-Zeitbereichsspektrometer mit dem Unterschied, dass das detektierte Signal kein einzelner THz-Puls ist, sondern sich beim Durchfahren der Zeitverzögerung periodisch wiederholt.

Anstatt das Licht zweier Laser zu überlagern, ist es auch möglich, einen Laser zu verwenden, der selbst schon bei zwei Wellenlängen emittiert [152]. Das Prinzip des Photomischers funktioniert zudem auch mit mehr als zwei Wellenlängen. Im Prinzip kann das Licht aus beliebig vielen verschiedenen Lasern überlagert werden, wodurch das resultierende THz-Signal sämtliche Differenzfrequenzen dieser verschiedenen Wellenlängen enthält. Insbesondere kann aber auch eine Multimode-Laserdiode verwendet werden, die von sich aus schon Licht bei vielen verschiedenen Wellenlängen emittiert. Das von einer solchen Laserdiode emittierte elektrische Feld kann beschrieben werden als:

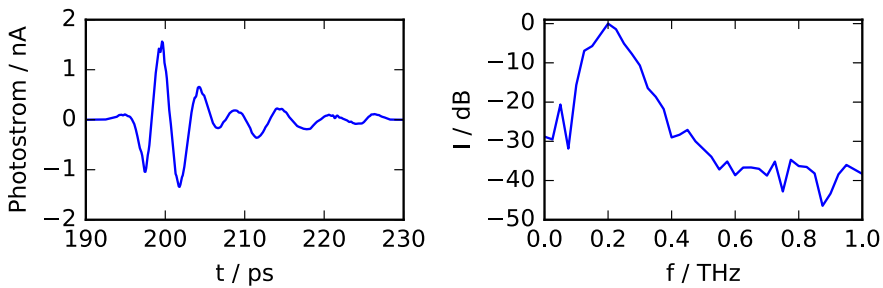
$$E_L(t) = \sum_{k=0}^n E_k \sin(\omega_k t + \phi_k)$$

Die Erzeugung des Mischsignals in der Emitter-Antenne läuft im Prinzip in derselben Art und Weise ab, wie oben für zwei Moden beschrieben [151]. Die Verwendung von dieser Art von Laser wurde erstmals von Tani et al. demonstriert [153] und von Scheller et al. weiterentwickelt [151, 154, 155]. Wenn die Moden einer solchen Laserdiode einen konstanten Abstand haben ($\Delta\omega = \omega_{k+1} - \omega_k$), folgt daraus, dass auch die im THz-Signal auftretenden Differenzfrequenzen sich ebenfalls auf einem äquidistanten Raster befinden. Je mehr Moden am Mischsignal beteiligt sind, desto deutlicher nimmt dieses im Zeitbereich eine Form an, die einer Abfolge von kurzen Pulsen zu gleichen scheint. Diese Quasi-Pulse sind der Grund für den Namen Quasi-Zeitbereichsspektroskopie (QTDS, engl. für Quasi Time Domain Spectroscopy). Der zeitliche Abstand der Quasi-Pulse entspricht dabei dem Kehrwert des Modenabstands, was z.B. bei einem Modenabstand von 25 GHz einen Abstand

¹Zum Zwecke der einheitlichen Darstellung wurde hier an Stelle der Schreibweise von Scheller et al. die inhaltlich äquivalente Schreibweise von Jepsen et al. für Gleichung 2.7 gewählt.



(a) Die Auswertung der Zeitbereichsdaten über einen längeren Zeitraum zeigt, dass sich das Signal aus diskreten Frequenzen zusammensetzt.



(b) Die Auswertung eines einzelnen Quasi-Pulses ergibt aufgrund der durch die Länge des Zeitausschnitts begrenzten Frequenzauflösung ein scheinbar kontinuierliches Spektrum im Frequenzbereich.

Abbildung 2.3.: Beispiel für ein mit einem THz-Quasi-Zeitbereichsspektrometer aufgenommenes Signal.

der Quasi-Pulse von 40 ps ergibt. Ein Beispiel für ein derartiges Signal ist in Abb. 2.3 dargestellt. Zwischen den Moden einer einfachen Multimode-Laserdiode können chaotische Phasensprünge auftreten. Diese werden jedoch durch die in Gl. 2.7 dargestellte Faltung des elektrischen Felds der THz-Strahlung mit der Leitfähigkeit der Detektorantenne aus dem detektierten Signal entfernt. Dies lässt sich auch so interpretieren, dass die Phasensprünge im Ergebnis der Messung deshalb nicht sichtbar sind, weil sie bei der Erzeugung und der Detektion in genau derselben Art und Weise auftreten und sich somit selbst ausgleichen. Auf eine Stabilisierung der emittierten Moden, wie sie bei einem aus mehreren Lasern aufgebauten Photomischsystem nötig wäre, und auf Modenkopplung, wie sie in einem TDS-System benötigt wird, kann also verzichtet werden. Gegenüber TDS-Systemen und Photomischern sind QTDS-Systeme, was die Kosten für den Aufbau eines solchen Systems betrifft, also stark im Vorteil, da entsprechende Multimode-Laserdioden als preisgünstige Massenware erhältlich sind. Gegenüber Photomischern mit nur zwei Wellenlängen besitzen sie zudem den Vorteil, dass die Phase des THz-Signals über einen deutlich längeren Zeitraum eindeutig bestimmt ist. Im Fall eines Photomischers mit nur zwei Wellenlängen wiederholt sich das THz-Signal im Zeitbereich nach nur einer Periodenlänge der Differenzfrequenz der beiden Wellenlängen. Aus diesem Grund ist die durch eine in den THz-Strahlengang eingebrachte Probe hervorgerufene Phasenänderung des

THz-Signale nur für sehr dünne Proben eindeutig bestimmt. Im Fall eines QTDS-Systems wiederholt sich das THz-Signal im Zeitbereich erst mit dem Auftreten des nächsten Quasi-Pulses, was für wesentlich dickere Proben eine eindeutige Bestimmung der Phase zulässt. Der maximal erreichbare eindeutige Phasenversatz ist somit in einem QTDS-System deutlich größer als in einem THz-CW-System, wenn auch deutlich kleiner als in einem TDS-System, in welchem er nur durch die Länge der Verzögerungsstrecke und die Repetitionsrate des modengekoppelten Lasers begrenzt ist. Der oben genannte für ein QTDS-System typische Abstand von 40 ps zwischen zwei Quasi-Pulsen ist jedoch für viele praktische Anwendungen vollkommen ausreichend. Eine weitere Einschränkung von QTDS gegenüber TDS stellt die Tatsache dar, dass sich ein QTDS-Signal aus diskreten Frequenzen mit einem Abstand von typischerweise 25 GHz zusammensetzt, während in einem TDS-System die Moden des Lasers so dicht zusammenliegen, dass das Spektrum des daraus resultierenden THz-Pulses praktisch als kontinuierlich betrachtet werden kann. Für die Detektion von scharfen Absorptionslinien eignet sich ein QTDS-System also nur sehr eingeschränkt. Im Fall von Proben, die sich breitbandig mehr oder weniger gleichmäßig auf das gesamte Signal auswirken, ist die QTDS-Technik jedoch sehr gut geeignet. Die Verarbeitung und Auswertung eines QTDS-Signals kann mit denselben Mitteln erfolgen, die in Abs. 2.3.4 schon für TDS-Signale beschrieben sind.

2.5. Sub-THz-Messtechnik

Der Frequenzbereich unterhalb des THz-Bereichs von etwa 10 GHz bis 100 GHz ist nach gängiger Definition Teil des Mikrowellen-Bereichs, welcher selbst aber schon bei niedrigeren Frequenzen von etwa 1 GHz beginnt. Der Begriff Sub-THz bringt zum Ausdruck, dass es sich um Frequenzen im oberen Teil des Mikrowellen-Bereichs und in unmittelbarer Nachbarschaft zum THz-Bereich handelt. In diesem Frequenzbereich gibt es technische Möglichkeiten zur Erzeugung und Detektion von elektromagnetischer Strahlung, die wesentlich größere Leistungen erlauben als die oben beschriebenen Techniken für den THz-Bereich. Diese Tatsache wird in Kapitel 4 zur Untersuchung eines Teils einer Pflanze genutzt, der wesentlich größer ist als ein einzelnes Blatt. Eine verbreitete Methode zur Erzeugung von Mikrowellenstrahlung in diesem Frequenzbereich stellen Gunn-Oszillatoren dar. Ein dazu passender Detektor kann auf Basis einer Schottky-Diode aufgebaut werden.

2.5.1. Gunn-Oszillator

Der Effekt, der einem Gunn-Oszillator zugrunde liegt, wurde von J. B. Gunn schon 1963 experimentell entdeckt und beschrieben [156]. Bei Versuchen mit n-dotierten Proben von GaAs und InP, an die von außen eine Spannung angelegt wurde, zeigte sich, dass nach dem Überschreiten einer Schwellenspannung der durch die Probe fließende Strom zu fluktuieren begann, sobald das elektrische Feld innerhalb der Probe in den Bereich von 2000 – 4000 V/cm kam. Insbesondere bei den Proben aus GaAs stellte sich eine sinusförmige Oszillation mit einer Frequenz von mehreren GHz ein, die sich dem Stromfluss durch die Probe überlagerte. Dabei wurde die beobachtete Frequenz in der Weise von den Proben bestimmt, dass die Frequenz sich reziprok zur Dicke der Proben verhielt. Die Periodendauer entsprach dabei der

Zeit, welche die Elektronen brauchten, um die Zeit vom einen zum anderen Ende der Probe zurückzulegen. Auch die technische Bedeutung der Entdeckung wurde von Gunn schon vorhergesehen.

Es stellte sich heraus, dass die experimentellen Ergebnisse von Gunn keine komplett neue Entdeckung darstellten, sondern durch die bereits 1961 veröffentlichte Theorie von Ridley und Watkins erklärt werden konnten, die beschreibt, wie in bestimmten Arten von Halbleitern ein negativer differentieller Widerstand auftreten kann [157]. Der zugrundeliegende Mechanismus besteht darin, dass Elektronen in ein drittes, energetisch oberhalb des normalen Leitungsbandes gelegenes Energieband befördert werden. In diesem dritten Band besitzen die Elektronen in GaAs eine geringere Mobilität als im Leitungsband, wodurch sich der elektrische Widerstand des Halbleiters vergrößert. Da dies, wie auch von Gunn beobachtet, dann geschieht, wenn die an die Probe angelegte Spannung, bzw. das daraus resultierende elektrische Feld, einen bestimmten Wert überschreitet, kommt es oberhalb dieser Schwelle zu einem negativen differentiellen Widerstand [158, 159]. Ein Halbleiter-Bauelement, in dem dieser Effekt zur Erzeugung einer Oszillation im Mikrowellenbereich genutzt wird, wird Gunn-Element oder Gunn-Diode genannt. In einem solchen bilden sich von der Kathode ausgehend Schichten, in denen Elektronen in das normalerweise unbesetzte Band oberhalb des Leitungsbands angehoben wurden. Diese Schichten, die eine niedrigere Leitfähigkeit besitzen als das sie umgebende Material, wandern mit dem Fluss der Elektronen von der Kathode zur Anode. Solange eine solche Schicht unterwegs ist, ist effektiv der zwischen den beiden Enden gemessene Widerstand der ganzen Probe erhöht. Sobald die Schicht die Anode erreicht und sich dort auflöst, besitzt die Probe wieder ihre ursprüngliche Leitfähigkeit, wodurch sich der durch die Probe fließende Strom kurzzeitig vergrößert. Nun bildet sich allerdings sofort eine neue Schicht mit verminderter Leitfähigkeit an der Kathode und der Vorgang beginnt von vorn. Diese Erklärung ist in direkter Übereinstimmung mit der Beobachtung von Gunn, dass die Periodendauer der Oszillation der Zeit entspricht, die die Elektronen für den Weg von der Kathode zur Anode benötigen.

Ein Gunn-Oszillator für technische Anwendungen besteht aus der Kombination von einem Gunn-Element und einem Hohlraumresonator. Die dabei verwendeten Gunn-Elemente bestehen aus drei unterschiedlich stark n-dotierten Schichten [159]. Die an die Kathode angrenzende Schicht ist stark dotiert, darauf folgt eine schwach dotierte Schicht und schließlich die an die Anode angrenzende mittelstark dotierte Schicht. Der Bereich, in welchem die durch den negativen differentiellen Widerstand hervorgerufenen Oszillationen auftreten, ist die mittlere, schwach n-dotierte Schicht. Die Frequenz der Oszillation wird also hauptsächlich durch die Dicke dieser Schicht bestimmt. Es ist aber durch entsprechende Gestaltung des Hohlraumresonators oder durch Integration des Gunn-Elements in einen Schwingkreis auch möglich, einem Gunn-Element eine davon abweichende Schwingungsfrequenz aufzuprägen [159]. Da das Gunn-Element durchgängig aus n-dotiertem Material besteht und keinen p-n-Übergang oder Schottky-artigen Übergang enthält, handelt es sich nicht im eigentlichen Sinn um eine Diode. Die dennoch gebräuchliche Bezeichnung „Gunn-Diode“ ist also etwas ungenau, lässt sich aber dadurch rechtfertigen, dass auch bei einem Gunn-Element zwischen den beiden Enden des Bauelements als Kathode und Anode unterschieden wird.

2.5.2. Schottky-Detektor

Zur Detektion eines Mikrowellensignals mit einer Schottky-Diode wird deren nicht-lineare Strom-Spannungs-Kennlinie genutzt. Diese lässt sich nach Yngvesson [160, Kap. 9] beschreiben als:

$$I(U) = I_s (e^{U/\eta k_B T} - 1) \simeq I_s e^{U/\eta k_B T}$$

Die Näherung, die die weitere Betrachtung vereinfacht, ist dann zulässig, wenn die Diode mit einer Gleichspannung vorgespannt wird, oder wenn das Mikrowellensignal groß genug ist, um die Aufgabe dieser Vorspannung zu übernehmen. Wenn wir den Gleichspannungsanteil mit U_0 bezeichnen und das Mikrowellensignal mit $\delta U = U_{RF} \sin(\omega t)$, kann der Strom in der Schottky-Diode als Taylor-Entwicklung um U_0 beschrieben werden [160, Kap. 9]:

$$I(U_0 + \delta U) = \underbrace{I(U_0)}_{I_1} + \underbrace{\left. \frac{dI}{dU} \right|_{U=U_0}}_{I_2} \delta U + \underbrace{\frac{1}{2} \left. \frac{d^2 I}{dU^2} \right|_{U=U_0}}_{I_3} (\delta U)^2 + \dots$$

Dabei stellt der erste Summand den Gleichstromanteil aufgrund der Vorspannung dar. Der zweite Summand wird durch den linearen Anteil der Leitfähigkeit dI/dU bestimmt und ist im zeitlichen Verlauf sinusförmig mit der Mikrowellenfrequenz ω . Der dritte, quadratische Summand stellt schließlich den nichtlinearen Effekt dar, welcher für die Detektion genutzt wird. Im zeitlichen Mittelwert stellt dieser Term eine von der eingestrahlen Leistung abhängige Änderung des Gleichstromsignals dar [160, Kap. 9]:

$$\langle I_3 \rangle = \left\langle \frac{1}{2} \left. \frac{d^2 I}{dU^2} \right|_{U=U_0} (U_{RF} \sin(\omega t))^2 \right\rangle = \frac{1}{4} \left. \frac{d^2 I}{dU^2} \right|_{U=U_0} U_{RF}^2$$

Es besteht also der Zusammenhang

$$\langle I_3 \rangle \propto U_{RF}^2 \propto P_{RF}$$

Da die Größe des vom Detektor ausgegebenen Signals proportional zum Quadrat der eingespeisten Spannung bzw. der Feldstärke ist, wird diese Art der Signalumwandlung auch als quadratische Detektion bezeichnet. Die in der praktischen Umsetzung gemessene Größe ist entweder direkt der durch die Diode fließende Strom oder die Vorspannung wird so geregelt, dass der Strom konstant gehalten wird. In letzterem Fall kann die an der Diode anliegende Spannung mit einem Transimpedanzverstärker gemessen werden. Zudem besteht die Möglichkeit, Detektor-Dioden zu konstruieren, die auch ohne Vorspannung schon zur Detektion von Mikrowellensignalen genutzt werden können, so genannte Zero-Bias-Dioden [160, Kap. 9][158, Kap. 9]. Um eine Schottky-Diode tatsächlich als Detektor für ein Mikrowellensignal nutzen zu können, muss diese dem elektrischen Feld dieses Signals bzw. der dadurch induzierten Spannung ausgesetzt werden. In einem in Hohlleitertechnik aufgebauten Detektor kann dies entweder dadurch geschehen, dass der Diodenchip direkt in den Hohlleiter eingebracht wird, oder indem zunächst ein Übergang vom Hohlleiter auf ein kurzes Stück Koaxialleitung erfolgt, in welche die Diode dann eingefügt wird [158, Kap. 11].

3. THz-Messungen

THz-Spektroskopie lässt sich auf verschiedene Arten für die Untersuchung von Pflanzen und insbesondere zur Beobachtung ihres Wasserstatus einsetzen. Wenn Pflanzen in ihrem Blattwassergehalt über einen längeren Zeitraum kontinuierlich überwacht werden sollen, ist dies nur durch eine Automatisierung der Messungen möglich. Ein Laboraufbau, in dem ein fasergekoppeltes THz-Zeitbereichsspektrometer für derartige Messungen zum Einsatz kommt, wird in Abschnitt 3.1 beschrieben. In diesem Versuchsaufbau wurden an verschiedenen Nutzpflanzen Langzeit-Messreihen durchgeführt, die dazu dienen, das Verhalten dieser Pflanzen unter Trockenstress zu untersuchen. Alternativ zum stationären Einsatz im Labor ist es auch möglich, ein fasergekoppeltes THz-Zeitbereichsspektrometer so aufzubauen, dass es portabel beispielsweise in einem Gewächshaus verwendet werden kann. Ein solches Messsystem wird in Abschnitt 3.2.2 vorgestellt. Obwohl es in vielen Fällen schon ausreicht, die Amplitude der durch ein Blatt transmittierten THz-Strahlung als Maß für den Wassergehalt des Blattes zu verwenden, kann es auch von Interesse sein, den Wassergehalt eines Blattes als Gewichts- oder Volumen-Anteil zu bestimmen. Ein auf der Theorie des effektiven Mediums basierendes Verfahren, das sich zu diesem Zweck verwenden lässt, wird in Abschnitt 3.2 vorgestellt. Schließlich zeigt die Anwendung von THz-Zeitbereichsspektroskopie zur Bestimmung der Keimfähigkeit von Rübensamen in Abschnitt 3.4, dass die THz-Spektroskopie ein universelles Werkzeug darstellt, für das sich in den Pflanzenwissenschaften neben der Blattwassergehaltsmessung auch noch weitere Anwendungsmöglichkeiten finden lassen.

3.1. Langzeit-Messungen

Das im Folgenden vorgestellte Messsystem besteht aus der Kombination eines fasergekoppelten THz-Zeitbereichsspektrometers und einer mechanischen Lösung zur Automatisierung der Messungen an mehreren Pflanzen zur selben Zeit. Die in dem Versuchsaufbau untersuchten Pflanzen wurden bis auf wenige Ausnahmen im selben Laborraum herangezogen, so dass die klimatischen Bedingungen für die Pflanzen während der Anzucht und während der Experimente dieselben waren. Nach der an die Gegebenheiten des Versuchsaufbaus angepassten Auswertung der Messdaten können diese schließlich daraufhin untersucht werden, welche pflanzenphysiologischen Schlussfolgerungen sich daraus ziehen lassen.

3.1.1. Versuchsaufbau

Das im Versuchsaufbau verwendete THz-Zeitbereichsspektrometer arbeitet nach dem unter 2.3 beschriebenen Funktionsprinzip, wobei zwei fasergekoppelte photoleitende Antennen als Emitter und Detektor zum Einsatz kommen. Bei den Antennen handelt es sich um fasergekoppelte Antennen-Module aus der Fertigung des Heinrich-

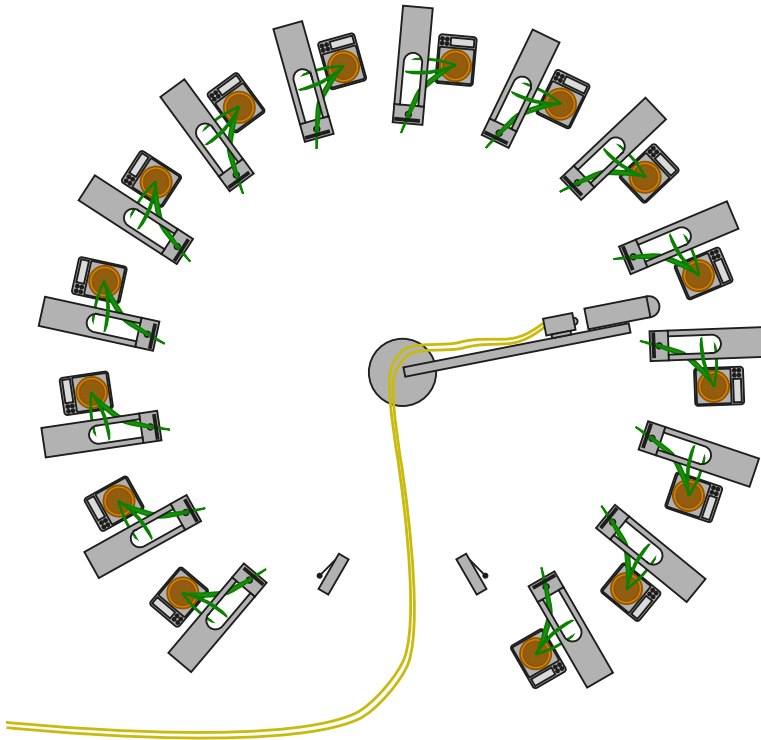


Abbildung 3.1.: Skizze des Versuchsaufbaus in der Übersicht (nicht maßstabsgetreu). Die Probenhalter, auf denen jeweils ein Blatt einer Pflanze mit einem Magneten befestigt ist, sind kreisförmig angeordnet, so dass sie von dem am Goniometerarm montierten Messkopf erreicht werden können. Auf dem Messkopf befinden sich die fasergekoppelten THz-Antennenmodule und die Linsen und Spiegel für die Führung des THz-Strahlengangs. Der Bewegungsbereich des Goniometerarms wird durch zwei Endschalter begrenzt. Die Töpfe mit den Pflanzen stehen auf elektronischen Waagen. Der Übersicht halber sind elektrische Verbindungen in der Skizze nicht dargestellt.

Hertz-Institut in Berlin. Der Laser („C-Fiber“ von Menlo Systems) emittiert bei einer Wellenlänge von 1550 nm Lichtpulse mit einer zeitlichen Halbwertsbreite von ca. 66 fs. Der Laser besitzt zwei fasergekoppelte Ausgänge, auf welche seine Gesamtausgangsleistung von ca. 60 mW aufgeteilt wird. Von einem der beiden Ausgänge wird das Licht ohne Unterbrechung fasergeführt bis zur Emitter-Antenne geleitet. Das Licht aus dem anderen Ausgang wird nach einem kurzen Stück Glasfaser durch einen Kollimator ausgekoppelt, um die in Freistrahntechnik aufgebaute Verzögerungsstrecke zu passieren. Diese wurde durch einen Retroreflektor realisiert, welcher auf einer Linear-Verfahreninheit (PI M-521DG) angebracht ist. Nach der Verzögerungsstrecke wird das Licht wieder in eine Glasfaser eingekoppelt und so zur Detektor-Antenne geleitet (vgl. Abb. 2.1b). Die Gesamtlänge der Singlemode-Glasfasern auf dem Weg vom Laser bis zu den beiden Antennenmodulen beträgt entsprechend der internen Dispersions-Kompensation des Lasers jeweils 36 m. Auch wenn diese große Länge für den Versuchsaufbau nicht nötig wäre, ist es dennoch wichtig, nicht von der gegebenen Auslegung der Dispersions-Kompensation abzuweichen.



Abbildung 3.2.: Auf diesem Foto befinden sich 15 Sojapflanzen im Versuchsaufbau.

Die Vorspannung der Emitter-Antenne ist eine Rechteck-Spannung mit einer Amplitude von ± 20 V und einer Frequenz von ca. 7,3 kHz. Dieses Signal wird mit 5 V TTL-Pegel auch dem Referenz-Kanal des Lock-In-Verstärkers (Signal-Recovery 7230) zugeleitet. An den Signaleingang des Lock-In-Verstärkers ist die Detektor-Antenne angeschlossen, wobei dessen interner Transimpedanzwandler verwendet wird.

Die Steuerung der Verzögerungsstrecke und der gleichzeitigen Datenaufnahme durch den Lock-In-Verstärker wurde in der Programmiersprache Python 3 implementiert. Der dabei verwendete objektorientierte Ansatz der Programmierung trennt den Teil der Software, der mit der Hardware kommuniziert, von dem Teil, der den Ablauf des Experiments steuert. Letzterer kann somit vergleichsweise übersichtlich gestaltet werden.

Die Antennenmodule sind, wie in Abb. 3.3 gezeigt, in ähnlicher Weise wie bei Born et al. [20] auf einem Messkopf montiert, welcher sich wiederum an dem Arm eines auf dem optischen Tisch montierten Goniometers befindet. Auf diese Weise kann der Messkopf motorisiert von einer Pflanze zur nächsten bewegt werden. Der THz-Strahlengang auf dem Messkopf wird zwischen den beiden Antennenmodulen durch insgesamt vier Linsen aus HDPE mit einer Brennweite von 40 mm geformt, so dass ein Zwischenfokus entsteht, in den die Proben eingebracht werden können. Zum kompakteren Aufbau des Messkopfs wird dieser Strahlengang zudem über zwei Spiegel U-förmig gefaltet. Die Probenhalter, auf denen die untersuchten Blätter platziert werden, fungieren gleichzeitig als Lochblenden mit einem Durchmesser von 3 mm, die den genauen Ort der Messung festlegen. Diese Probenhalter werden in einer Höhe von 22,5 cm über der Oberfläche des optischen Tisches so angebracht, dass die Lochblenden bei passender Ansteuerung des Goniometers vom Zwischenfokus des Messkopfs getroffen werden. Der Kreis, auf welchem die Lochblenden der Probenhalter auf diese Weise angeordnet sind, hat einen Radius von 43,5 cm. Diese Anordnung wird in Abb. 3.1 und Abb. 3.2 dargestellt. Zur Befestigung der Blätter auf den Probenhaltern dienen Magnete, die genug Kraft ausüben, um die Blätter in Position zu halten, diese aber nicht beschädigen. Das Goniometer wird von einem Schrittmotor (Trinamic Pandrive PD2-110-42-485) angetrieben. Die Positionierung des Messkopfs wird dabei durch die Anzahl der durch den Motor ausgeführten Schritte gesteuert.

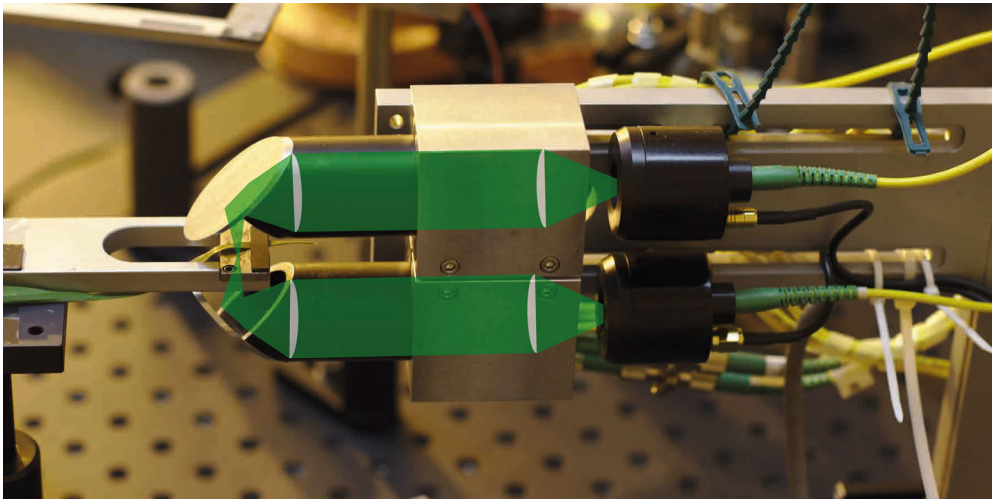


Abbildung 3.3.: Der Messkopf ist auf diesem Foto gerade für eine Messung an einem Probenhalter mit einem Blatt positioniert. Der THz-Strahlengang und die Linsen sind durch die überlagerte grüne Skizze angedeutet.

An den beiden Enden des Bewegungsbereichs sind Endschalter angebracht, die den Motor im Falle einer Fehlpositionierung, die über den gewollten Bereich hinausgeht, stoppen und so eine Beschädigung des Versuchsaufbaus verhindern. Damit sich kleinere Fehler in der Positionierung nicht aufsummieren, wird zudem einer der beiden Endschalter als Referenzschalter genutzt, der regelmäßig angefahren wird, um den Nullpunkt der Positionierung neu zu bestimmen. Die Ansteuerung des Schrittmotors wurde in die oben genannte Software integriert.

Für die Beleuchtung der Pflanzen ist eine Natrium-Hochdruckdampflampe (Bio Green Sirius X400) mit einer elektrischen Leistung von 400 W in einem Abstand von 135 cm über der Tischoberfläche zentral über der Versuchsanordnung angebracht. Diese Lampe wird zur Simulation von Tag und Nacht von einer Zeitschaltuhr in einem Rhythmus von 12 Stunden an- und ausgeschaltet.

Um ein Maß für die Menge an Wasser zu haben, die den Pflanzen in den Töpfen zur Verfügung steht, bzw. die während eines Trockenstressexperiments verloren geht, befinden sich die Töpfe auf elektronischen Waagen. Bedingt durch die große Anzahl der Pflanzen musste hierfür eine preiswerte Lösung gefunden werden, die einen praktikablen Kompromiss zwischen der Präzision der Waagen und den damit verbundenen Kosten darstellt. Die verwendeten Waagen sind eigentlich für Batteriebetrieb vorgesehen und wurden für den Versuchsaufbau so modifiziert, dass eine kontinuierliche Messwertaufzeichnung möglich wird. Zu diesem Zweck wurde eine Schnittstellenelektronik aufgebaut, welche die Stromversorgung der Waagen von außen sicherstellt und gleichzeitig mittels eines dazu programmierten Mikrocontrollers den auf dem Display der Waagen angezeigten Messwert ausliest. Die Kommunikation zwischen den so aufgebauten Adapter-Platinen und dem PC, der das Experiment steuert, erfolgt über einen RS485-Bus.

Zur Überwachung der klimatischen Bedingungen im Labor wurden Sensoren zur Erfassung der Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit an drei verschiedenen Stellen im Labor angebracht. Einer der Sensoren befindet sich auf dem optischen Tisch, einer in

der Nähe des separaten Tisches, auf dem die Pflanzen für die Versuche heranwachsen, und der dritte befindet sich im Abstand von ca. 30 cm vor dem Luftauslass der Klimaanlage. Auch für diese Sensoren wurde eine Adapter-Elektronik aufgebaut, welche sie mittels eines RS485-Bus an den Labor-PC anbindet.

3.1.2. Pflanzen und Anzucht

Zur Anzucht der Pflanzen im Labor wurde kommerziell erhältliche Blumenerde verwendet (Compo Sana Grünpflanzen- und Palmenerde). In Kunststofftöpfen mit einem Durchmesser von 11 cm und einem Volumen von 0,6 l wurden je 150 g Erde abgewogen. Um sicherzustellen, dass letztendlich in jedem Topf eine Pflanze wächst, wurden in jedem Topf ca. 5-7 Samen ausgesät. Für die Trockenstressexperimente wurden jeweils 15 Töpfe auf diese Weise vorbereitet. Die Töpfe wurden auf einem separaten Tisch aufgestellt und regelmäßig bewässert. Über diesem Tisch befand sich eine Natrium-Hochdruckdampflampe desselben Typs wie auch über dem eigentlichen Versuchsaufbau. Falls in einem Topf mehrere Samen aufkeimten und sich somit darin mehr als eine Pflanze befand, wurden die überzähligen Pflanzen aus dem Topf entfernt. In Ausnahmefällen wurden in einem Topf mehr als eine Pflanze belassen, um die Gesamtanzahl von 15 Pflanzen für das Experiment zu gewährleisten.

Eine weitere Ausnahme stellen die Pflanzen im zweiten und dritten Trockenstressexperiment mit Sojapflanzen dar. Diese wurden in einem Gewächshaus des Botanischen Gartens der Universität Marburg herangezogen und befanden sich in größeren Töpfen mit einem Gesamtgewicht von ca. 800 g.

3.1.3. Ablauf der Messungen und Datenauswertung

Wie oben beschrieben sind in den Probenhaltern Lochblenden mit einem Durchmesser von 3 mm enthalten. Damit im Endergebnis der Datenauswertung der Einfluss der Lochblenden nicht enthalten ist, müssen diese zunächst alleine ohne Proben charakterisiert werden. Zu diesem Zweck wird der Messkopf zunächst für eine Referenzmessung jeweils direkt neben den Probenhaltern platziert. Da diese Referenzmessung, in der sich weder ein Probenhalter noch eine Probe im THz-Strahlengang befindet, dazu dient, Schwankungen des Messsystem auszugleichen, sollte zwischen der Referenzmessung und der Probemessung möglichst wenig Zeit vergehen. Hier ist außerdem auch die räumliche Nähe zum Probenhalter wichtig, damit zwischen den beiden Messungen die zum Messkopf führenden Glasfasern möglichst wenig gebogen werden. Anschließend wird der Messkopf in derselben Art und Weise am Probenhalter platziert wie auch bei den anschließenden Messungen mit den Pflanzen. Auf diese Weise wird für alle 15 Probenhalter charakterisiert, wie die THz-Strahlung in Abhängigkeit vom Durchmesser und der Justage der Lochblende durch den leeren Probenhalter transmittiert wird. Dieser Vorgang wird zum Zweck der Mittelwertbildung einige Male wiederholt. Nachdem die Charakterisierung der leeren Probenhalter abgeschlossen ist, wird auf jedem Probenhalter jeweils ein Blatt einer Pflanze platziert, so dass die Lochblende durch das Blatt komplett verdeckt wird. Nun kann das eigentliche Experiment gestartet werden, in dem, wie schon bei der Charakterisierung der Probenhalter, unmittelbar vor jeder Messung an einem Blatt zunächst eine Referenzmessung ohne Halter oder Probe aufgenommen wird. Die Bewegung

des Messkopfs startet beim linken der beiden Endschanter (vgl. Abb. 3.1) und fährt im Uhrzeigersinn von Pflanze zu Pflanze fort. Nach der Messung an der letzten Pflanze wird der Messkopf zurück zum linken Endschanter bewegt und der Ablauf startet erneut. Eine solche Runde, in der an jeder der 15 Pflanzen eine THz-Messung durchgeführt wird, dauert in etwa eine Stunde.

Aus den Messungen mit den leeren Probenhaltern kann entsprechend Gleichung (2.5) frequenzabhängig bestimmt werden, wie groß die Amplitude der durch die leere Lochblende transmittierten THz-Strahlung mit Bezug zur Referenzmessung ist. Selbiges gilt für die Messungen, bei denen sich die Blätter auf den Probenhaltern befinden. Für die durch das Blatt transmittierte Signalamplitude ohne den Einfluss des Probenhalters gilt somit:

$$t_{\text{Blatt}}(f) = \frac{t_{\text{Experiment}}(f)}{t_{\text{Halter}}(f)}$$

Im Folgenden wird für die weitere Auswertung der Mittelwert der Transmissionswerte im Frequenzfenster von 100 GHz bis 200 GHz verwendet, das im verwendeten Versuchsaufbau im Bereich des größten Signal-zu-Rauschen-Abstands liegt.

3.1.3.1. Bestimmung des relativen Wassergehalts

Für die Darstellung der Ergebnisse der Messreihen werden im Folgenden hauptsächlich die Transmissionswerte als direktes Ergebnis der Messungen verwendet. Für die weitere Interpretation dieser Ergebnisse ist es aber nützlich, aus einer Änderung der Transmission auch quantitativ auf die Änderung des Blattwassergehalts schließen zu können. In einer stark vereinfachten, aber zweckmäßigen Modellvorstellung kann man die Transmission des THz-Signals durch das Blatt beschreiben als die Transmission durch eine dünne Wasserschicht, deren Dicke d als „effektive Wasserdicke“ des Blattes definiert wird. Der transmittierte Anteil der Signalamplitude (vgl. Gl. (2.5)) ergibt sich dann als:

$$t = e^{-\frac{1}{2}\alpha d} \quad (3.1)$$

Wenn man außerdem annimmt, dass das Blatt zu einem Zeitpunkt die effektive Wasserdicke d_1 besitzt, und zu einem anderen Zeitpunkt die effektive Wasserdicke d_2 , während die Fläche des Blattes zu allen Zeitpunkten gleich bleibt, dann lässt sich das Verhältnis der Wassergehalte zu den beiden Zeitpunkten einfach beschreiben als:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{d_2}{d_1}$$

Einsetzen von (3.1) liefert:

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{-\frac{2}{\alpha} \ln t_2}{-\frac{2}{\alpha} \ln t_1} = \frac{\ln t_2}{\ln t_1} \quad (3.2)$$

Dieser einfache Zusammenhang erlaubt also allein auf Grundlage der transmittierten Signalamplituden den Vergleich der Wassergehalte zu den beiden Zeitpunkten.

In Gleichung (2.2) wird der relative Wassergehalt eines Blattes mit Bezug auf den Wassergehalt bei vollständiger Sättigung des Blattes definiert. Aus praktischen Gründen wird bei der gravimetrischen Bestimmung des relativen Wassergehalts, wie

sie in Abschnitt (2.2.1) beschrieben wird, das untersuchte Blatt nachträglich künstlich mit Wasser gesättigt. Der Wassergehalt bei vollständiger Sättigung soll dabei den Zustand eines gesunden, gut mit Wasser versorgten Blattes widerspiegeln. Dieser Wert ist bei der gravimetrischen Messung nicht direkt zugänglich und muss deshalb in der beschriebenen Weise künstlich hergestellt werden. Diese Vorgehensweise neigt jedoch dazu, das Blatt stärker mit Wasser zu sättigen als es eigentlich seinem gesunden Zustand an der Pflanze entsprechen würde. Dies kann dann zustande kommen, wenn nach der Sättigung auch auf der Oberfläche des Blattes noch Wasser zurückbleibt. Ein weiterer Grund dafür kann sein, wenn das Blatt zuvor im Zuge der osmotischen Regulation seines Wassergehalts aufgrund schlechter Wasserversorgung osmotisch aktive Substanzen in seinen Zellen angehäuft hat. In diesem Fall wird es, sobald es zu einem Überangebot an Wasser kommt, mehr Wasser aufnehmen als seinem normalen, gesunden Wassergehalt entspricht. Diese Tendenz zur Überschätzung des Wassergehalts des gesunden Blattes bedeutet, dass die Bestimmung des relativen Wassergehalts entsprechend Gleichung (2.2) tendenziell etwas zu kleine Werte liefert [161].

Als alternative Herangehensweise kann als Bezugsgröße bei der Bestimmung des relativen Wassergehalts anhand von Gleichung (3.2) der tatsächliche Wassergehalt des Blattes bei guter Wasserversorgung der gesunden Pflanze verwendet werden. Durch die nicht-invasive Vorgehensweise bei der THz-Messung ist es ohne weiteres möglich, die transmittierte Signalamplitude zunächst bei guter Wasserversorgung der Pflanze zu messen, um diesen Wert später als Bezugsgröße für die Bestimmung des relativen Wassergehalts zu verwenden. So erhält man für den relativen Wassergehalt:

$$RWC_{THz} = \frac{\ln t}{\ln t_0} \quad (3.3)$$

Dabei ist t_0 der transmittierte Anteil der Signalamplitude bei der Messung am gesunden Blatt und t der Wert der späteren Messung. Das Problem der tendenziellen Übersättigung des Blattes bei der gravimetrischen Bestimmung des relativen Wassergehalts wird so also behoben. Allerdings liegt hier nun eine neue mögliche Fehlerquelle in der Frage, ob die erste der beiden zueinander ins Verhältnis gesetzten Messungen tatsächlich an einem gesunden Blatt durchgeführt wird. Zur zuverlässigen Bestimmung dieser Größe sollte darauf geachtet werden, dass die Messwerte bei guter Wasserversorgung der Pflanze über einen längeren Zeitraum weitgehend konstant sind.

Insgesamt verfolgen die etablierte Definition des relativen Wassergehalts nach Gleichung (2.2) und die alternative Definition in Gleichung (3.3) also dasselbe Ziel, weichen aber prinzipbedingt in ihrem Ergebnis leicht voneinander ab.

3.1.4. Fehlerquellen

Fehler und Schwankungen in den Ergebnissen der Messungen können prinzipiell durch alle am Versuchsaufbau beteiligten Komponenten verursacht werden. Dabei kann man unterscheiden zwischen unvermeidbaren statistischen Schwankungen der Messwerte und Defekten an einzelnen Komponenten, die während der Langzeitmessungen schleichend auftraten und sich so auf einen Teil der Messdaten auswirkten, bevor sie erkannt und behoben werden konnten. Die generellen Unsicherheiten bei

THz-Zeitbereichsmessungen wurden von Withayachumnankul et al. umfassend beschrieben [162]. Im Folgenden werden vor allem diejenigen Fehlerquellen dargestellt, welche in dem hier verwendeten Versuchsaufbau zu Tage getreten sind. Glücklicherweise muss sich nicht jede dieser Fehlerquellen tatsächlich in einem störenden Ausmaß auf das Ergebnis einer Messung auswirken. Da sich, wie in Abschnitt 2.3.4 dargestellt, das Ergebnis einer Messung immer aus dem Vergleich der Messung mit der untersuchten Probe und einer Referenz-Messung ergibt, heben sich alle Fluktuationen, die beide Messungen in gleichem Maße betreffen, gegeneinander auf und beeinflussen nicht das Ergebnis der Datenauswertung. Langsame Schwankungen der Amplitude oder Phase des THz-Signals stellen also in der Regel kein Problem dar. Nur wenn diese gerade zwischen der Referenz- und der Probe-Messung auftreten, wirken sie sich auf das Ergebnis des Experiments aus.

Schwankungen der optischen Leistung der Femtosekunden-Lichtpulse, die bei den THz-Antennen ankommen, wirken sich direkt auf die Amplitude der THz-Pulse aus. Eine Ursache dafür kann ein Fluktuieren der Ausgangsleistung des Lasers sein. Dieses kann aufgrund von thermischen Schwankungen zustande kommen, welche die interne Justage des Lasers beeinträchtigen. Andererseits trat im Januar 2015 ein Defekt einer Pumpdiode des Lasers auf. Dieser Defekt verursachte einen Totalausfall des Lasers und wurde durch die Firma Menlo Systems durch einen Austausch der Pumpdiode behoben. Allerdings ging dem Totalausfall ein schleichender Verlust an Ausgangsleistung des Lasers voran. Die genaue Ursache dafür ist unklar, da nach Auskunft von Menlo Systems die in dem Laser verwendeten Pumpdioden typischerweise nicht langsam degradieren, sondern bis zum Auftreten eines Defekts vollständig funktionieren. Im optischen Weg vom Laser zur Detektor-Antenne befindet sich die als Freistrahl-Aufbau realisierte Verzögerungsstrecke. Hier kann sich also die Justage der zur Strahlführung verwendeten Spiegel und des Retroreflektors auf der Verzögerungsstrecke auf die Einkopplung des Lichts in die Glasfaser, die zur Antenne führt, auswirken. Ursachen dafür können thermische Effekte oder mechanische Ungenauigkeiten bei der Bewegung der Verzögerungsstrecke sein. Ebenfalls durch die Verzögerungsstrecke können Fluktuationen der Phase des THz-Signals verursacht werden. Diese kann zudem auch durch die Glasfasern, die zu den Antennen-Modulen führen, beeinflusst werden. Die optischen Eigenschaften der Glasfasern können sich sowohl aufgrund von Temperaturschwankungen als auch durch mechanisches Verbiegen der Glasfasern ändern, was eine Änderung der Laufzeit des Lichts durch die Fasern zur Folge hat. Eine andere Ursache für Schwankungen der Amplitude des THz-Signals kann auch die an die Emitter-Antenne angelegte Vorspannung darstellen, sofern diese nicht konstant ist. Im Normalfall stellt dies keine relevante Fehlerursache dar, jedoch trat an dem Frequenzgenerator, der für die Emitter-Antenne die rechteckförmige Vorspannung generiert, ein Defekt des Ausgangstreibers auf, der zu merklichen Schwankungen der Amplitude der ausgegebenen Spannung führte. Da dieser Defekt nicht zu einem kompletten Ausfall des Messsystems führte und sich vermutlich nur schleichend vergrößerte, ist unklar auf wie viele Messungen er sich ausgewirkt haben kann, bevor das Problem im Oktober 2015 deutlich sichtbar wurde und die Spannungsversorgung repariert wurde.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle stellen Defekte in der Verkabelung des Versuchsaufbaus dar. Diese müssen z.B. im Fall eines sich durch einen Wackelkontakt an einer Steckverbindung ändernden Übergangswiderstandes nicht gleich zu einem

Totalausfall des Messsystems führen, wodurch sie mitunter schwer zu erkennen und zu lokalisieren sind. So traten für einige Zeit in sporadischer Häufung Ausreißer-Messwerte auf, deren Anzahl sich nach dem Austausch des Kabels zur Spannungsversorgung der Emitter-Antenne stark reduzierte.

Die bisher besprochenen Fehlerquellen betreffen die Aufnahme der THz-Wellenform und können in dieser oder in ähnlicher Form prinzipiell in allen THz-Zeitbereichs-Spektrometern auftreten. Für den hier verwendeten Versuchsaufbau spezifisch ist die Tatsache, dass der Messkopf mit den THz-Antennenmodulen und dem THz-Strahlengang für die Messungen mechanisch von einer Pflanze zur nächsten bewegt wird. Diese Bewegung bedeutet in jedem Fall einen mechanischen Einfluss auf die zu den Antennenmodulen führenden Glasfasern, der sich wie oben beschrieben auf das THz-Signal auswirken kann. Dieser Effekt kann minimiert werden, indem zu jeder Messung an einer Pflanze die dazugehörige Referenzmessung in unmittelbarer Nähe des untersuchten Blattes durchgeführt wird, so dass zwischen den beiden Messungen nur eine möglichst kurze Strecke zurückgelegt werden muss.

Für die Reproduzierbarkeit der Messungen ist auch die Reproduzierbarkeit der Position, an welcher die Messung auf dem Blatt ausgeführt wird, von entscheidender Bedeutung. Am wichtigsten ist dabei die Positionierung des Goniometerarms mit dem Messkopf durch den Schrittmotor, welcher das Goniometer antreibt. Die Ansteuerung der Positionen wird dabei durch die Anzahl der durch den Motor ausgeführten Schritte bestimmt. Mechanische Einwirkungen auf den Goniometerarm können dabei zu Fehlern in der Positionierung führen. Wenn beispielsweise ein Teil einer Pflanze in den Weg des Goniometerarms gerät und mit diesem zusammenstößt, kann es dazu kommen, dass zwar die Steuerungselektronik des Schrittmotors diesen mit der korrekten Anzahl an Schritten ansteuert, aber dennoch nicht die gewünschte Bewegung ausgeführt wird. Eine weitere denkbare Ursache für Fehler in der Positionierung des Goniometerarms besteht darin, dass dieser aufgrund seiner Trägheit beim Anhalten nicht genau an der gewollten Position stoppen könnte, sondern sich noch ein kleines Stück weiterbewegen könnte. Um eine flüssige Bewegung zu gewährleisten, wird der Schrittmotor im Teilschrittbetrieb angesteuert. Jedoch kann der Schrittmotor an Positionen, welche auf Vollschritten liegen, mehr Kraft aufbringen, um dort stehenzubleiben und die Position zu halten. Für die Platzierung der Probenhalter sind diese Positionen also von Vorteil. Ein weiterer Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Positionierung des Messkopfes relativ zu den Probenhaltern besteht in dem wechselnden thermischen Einfluss der über dem Versuchsaufbau aufgehängten Natriumhochdruckdampflampe. Der Wärmeeintrag während des Betriebs der Lampe kann zur Verformung von Metallteilen führen. Dies kann sowohl die Probenhalter als auch den Goniometerarm betreffen. Letzterer hat vom Zentrum des Goniometers bis zu den Probenhaltern eine Länge von 43,5 cm. Wenn man den maximalen Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht großzügig mit 10 K abschätzt, um neben den wesentlich kleineren Unterschieden der durch die Klimaanlage stabilisierten Lufttemperatur auch ein mögliches Aufheizen des Goniometerarms durch die von der Lampe kommende Wärmestrahlung zu berücksichtigen, ergibt sich mit dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Aluminium ($\alpha = 23,1 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$ [163]) eine maximale Längenänderung des Goniometerarms von 0,1 mm. Dieser Wert liegt in einer Größenordnung, die einen Einfluss auf das Ergebnis der Messungen unwahrscheinlich, aber nicht ausgeschlossen erscheinen lässt. In jedem Fall sollte

dieser Einfluss bei korrekter Justage der Probenhalter und ihrer Lochblenden mit 3 mm Durchmesser nur eine untergeordnete Rolle spielen.

Letztendlich können selbst dann, wenn man alle technischen Fehlerursachen ausschließt, gelegentlich ungewollte Schwankungen oder Sprünge im Ergebnis einer Langzeitmessreihe auftreten, wenn das für die Messungen auf einem Probenhalter befestigte Blatt sich verschiebt, so dass die untersuchte Stelle auf dem Blatt sich ändert. Um eine Beschädigung der Blätter zu vermeiden, dürfen diese zur Befestigung nicht beliebig stark eingeklemmt werden. Das bedeutet aber auch, dass schon leichte mechanische Einflüsse wie ein Streifen der Pflanze durch den Messkopf oder ein versehentliches Berühren mit der Hand zu einer Verschiebung des Blattes führen können. Auch das Wachstum der Pflanzen kommt als Ursache dafür in Betracht.

3.1.5. Artefakte in den Messdaten

Es liegt in der Natur der über mehrere Wochen andauernden Langzeit-Messreihen, dass beim Auftreten eines Problems das Experiment nicht zur sofortigen Fehler-suche gestoppt und anschließend neu gestartet werden kann. Insbesondere in einem Trockenstress-Experiment ist eine Unterbrechung oder ein Neustart des Experiments nicht mehr möglich, sobald die Bewässerung der Pflanzen ausgesetzt wurde, so dass der Trockenstress für die Pflanzen bereits begonnen hat. Stattdessen müssen durch Messfehler verursachte Artefakte zu einem gewissen Grad in Kauf genommen und im Anschluss an die Messungen angemessen behandelt werden. Nicht immer lässt sich an den in den Messdaten aufgetretenen Artefakten erkennen, welche der im vorigen Abschnitt beschriebenen möglichen Fehlerursachen jeweils dafür verantwortlich sind. Aus diesem Grund werden die typischen, wiederkehrend aufgetretenen Fehlerbilder im Folgenden phänomenologisch beschrieben und in ihrer Auswirkung auf die Verwertbarkeit der Messdaten eingeordnet.

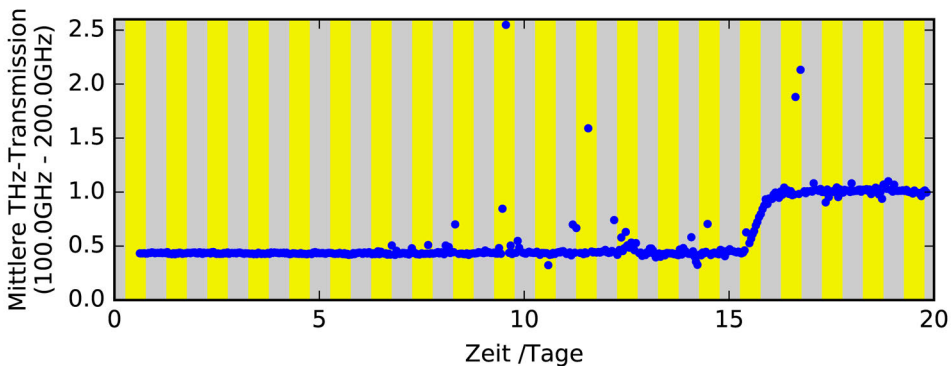


Abbildung 3.4.: Beispiel für eine Messreihe an einer Maispflanze mit deutlichen Ausreißer-Messwerten (vgl. Messreihe 4 in Abb. 3.18)

1. Es kommt vor, dass einzelne Messwerte stark von den anderen Messwerten in ihrer direkten Nachbarschaft abweichen. Je extremer die Abweichung ist, desto leichter sind diese Messwerte als Ausreißer zu identifizieren, die nicht in der weiteren Auswertung berücksichtigt werden sollten. Mögliche Ursachen

für derartige Fehlmessungen sind die oben erwähnten Defekte der Spannungsversorgung der Emitter-Antenne und der Verkabelung, die zeitweise auftraten. Eine biologische Ursache kann bei starken Ausreißern ausgeschlossen werden, da eine spontane Schwankung des Blattwassergehalts in diesem Umfang und in dieser Geschwindigkeit unplausibel erscheint. Sofern solche Abweichungen nur vereinzelt auftreten, wird die Verwertbarkeit der übrigen Messdaten durch sie praktisch nicht beeinträchtigt.

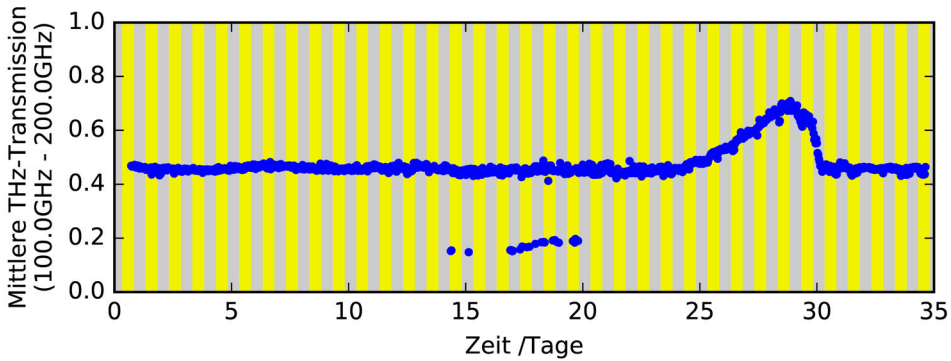


Abbildung 3.5.: Beispiel für eine Messreihe an einer Roggenpflanze mit Ausreißer-Messwerten, die um einen diskreten Betrag von den sonstigen Messwerten abweichen (vgl. Messreihe 15 in Abb. 3.9).

2. In manchen Messreihen treten Ausreißer-Messwerte auf, die augenscheinlich keine vollkommen zufälligen Werte annehmen, sondern um diskrete Beträge von den sonstigen Messwerten abweichen. Ähnlich wie bei Punkt 1 können schlagartige Änderungen des Blattwassergehalts auch für diese Art von Artefakt als biologische Ursache ausgeschlossen werden. In der Regel handelt es sich dabei um Abweichungen nach unten hin zu kleineren Messwerten, was vermuten lässt, dass die Abweichung der Messwerte daher rührt, dass der THz-Fokus die Lochblende im Probenhalter aufgrund einer Abweichung in der Positionierung des Messkopfs nicht optimal trifft. Sofern sich die Anzahl dieser Ausreißer in Grenzen hält, ist auch hier die Verwertbarkeit der Messdaten weiterhin gewährleistet.

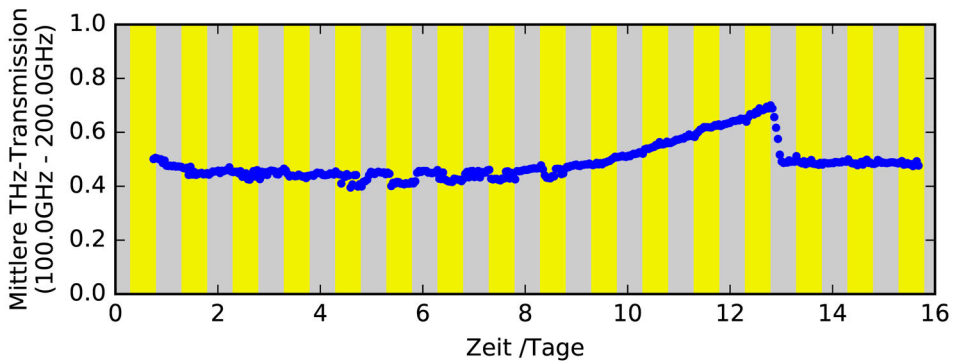


Abbildung 3.6.: Zwischen Tag 4 und 8 in dieser Messreihe an einer Haferpflanze ist zu sehen, wie die Messwerte zwischen diskreten Niveaus wechseln (vgl. Messreihe 5 in Abb. 3.12).

3. Eine Abwandlung von Punkt 2 stellt der Fall dar, dass die Messwerte zwischen zwei diskreten Niveaus wechseln und es sich dabei nicht um einzelne Ausreißer handelt. Stattdessen bleiben die Messwerte für mehrere Stunden scheinbar stabil auf dem jeweiligen Niveau, bis wieder ein schlagartiger Wechsel stattfindet. Auch hier kommt als Ursache eine abweichende Positionierung des Messkopfs in Betracht. Oft, aber nicht immer, ist der Wechsel zwischen den beiden Niveaus synchron mit dem Wechsel zwischen Tag und Nacht, bzw. mit dem An- und Ausschalten der Natrium-Hochdruckdampflampe. In diesem Fall bedarf es einer genaueren Betrachtung des Kurvenverlaufs, um zu unterscheiden, ob es sich um einen durch das An- und Ausschalten der Beleuchtung ausgelösten biologischen Effekt handelt, oder um ein Artefakt. Im Fall eines biologischen Effekts darf ein stetiger Kurvenverlauf erwartet werden, wohingegen das hier beschriebene Artefakt durch schlagartige Sprünge gekennzeichnet ist. Einen weiteren Anhaltspunkt für die Unterscheidung dieser beiden möglichen Ursachen liefert der Vergleich der Kurvenverläufe der verschiedenen gleichzeitig in einem Experiment untersuchten Pflanzen. In der Regel tritt das hier beschriebene Phänomen nicht während des gesamten Versuchszeitraums auf, sondern abschnittsweise über Zeiträume von wenigen Tagen. Dabei beginnen und enden diese Abschnitte oft gleichzeitig für mehrere oder sogar alle Pflanzen in einem Experiment, obwohl ansonsten zwischen den Pflanzen keine solche Synchronität besteht. Sobald der Blattwassergehalt einer Pflanze messbar sinkt, treten oft Schwankungen der Messwerte im Tag-Nacht-Rhythmus auch aus biologischen Gründen auf. Diese treten jedoch nicht als diskrete Sprünge auf, sondern in stetiger Form und der Zeitpunkt ihres Beginns ist nicht mit anderen Pflanzen synchronisiert. Aufgrund dieser charakteristischen Formen ist eine Unterscheidung der beiden Phänomene möglich. Störend sind diese als Artefakt identifizierten Sprünge der Messwerte vor allem dann, wenn sie gleichzeitig mit der Austrocknung des Blattes auftreten und sich derart mit der biologisch begründeten Änderung der Messwerte überlagern, dass Artefakt und biologischer Effekt kaum noch voneinander zu trennen sind. Wenn das Artefakt hingegen in einem Zeitraum liegt, in dem keine messbare Austrocknung des

Blattes erkennbar ist, erschwert es zwar die weitere Auswertung, beeinträchtigt die Verwertbarkeit der Messdaten aber letztendlich nur geringfügig.

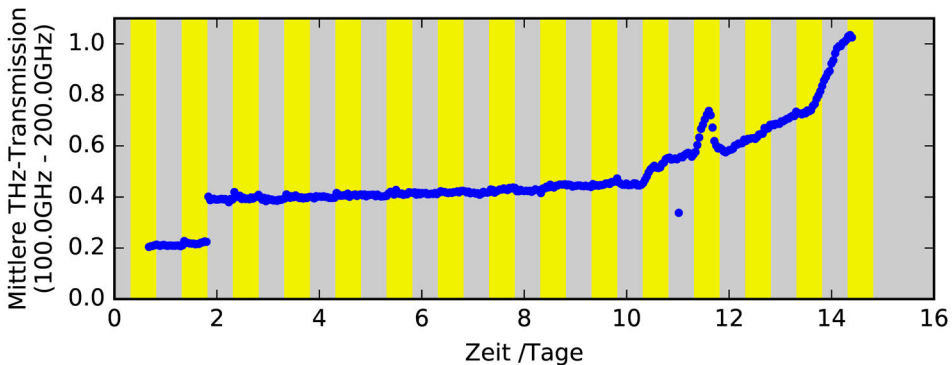


Abbildung 3.7.: Zu Anfang der Messreihe an einer Maispflanze war das Blatt und evtl. auch der Magnet, der das Blatt hält, auf der Halterung verrutscht, was sich in einem Sprung in den Messwerten äußert (vgl. Messreihe 3 in Abb. 3.15).

4. Auch als Artefakt bezeichnet werden kann ein Sprung in den Messdaten, der durch das Verrutschen des untersuchten Blattes auf dem Probenhalter verursacht wird, so dass nach dem Verrutschen die Messungen an einer anderen Stelle des Blattes mit anderem Wassergehalt fortgesetzt werden. Vom messtechnischen Standpunkt aus betrachtet handelt es sich bei der Änderung des Messwerts dann zwar um einen realen Effekt und nicht um einen Messfehler. In Bezug auf die zeitliche Entwicklung des Blattwassergehalts handelt es sich aber um ein Artefakt. In der grafischen Darstellung der Messreihe kann dieses zunächst ähnlich aussehen wie das unter Punkt 3 beschriebene Phänomen. Jedoch wechselt dort das Niveau der Messwerte in der Regel mehrfach zwischen zwei diskreten Niveaus, während das Verrutschen des Blattes ein einmaliges Ereignis darstellt. Ob die Verwertbarkeit einer Messreihe durch einen solchen Sprung beeinträchtigt wird, hängt von dem Zeitpunkt ab, zu dem er auftritt und davon, wie groß die Änderung der Messwerte ausfällt.

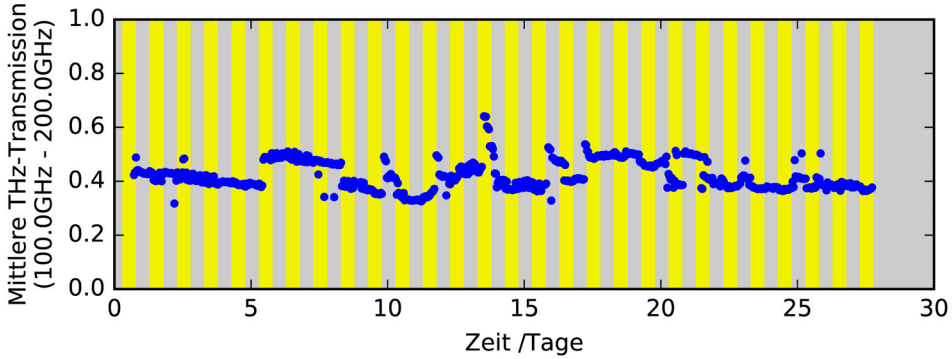


Abbildung 3.8.: Beispiel für eine Messreihe an einer Weizenpflanze, in der Ausreißer und Artefakte überhand nehmen und keine Interpretation der Daten zulassen (vgl. Messreihe 6 in Abb. A.6).

5. Wie in den vorhergegangenen Punkten beschrieben, lassen sich in den meisten Fällen plausible von fehlerhaften Messwerten unterscheiden, so dass auch eine Interpretation von mit Artefakten behafteten Messreihen möglich ist. Jedoch kommt es auch vor, dass in einzelnen Messreihen mehrere störende Effekte als Kombination von systematischen und zufälligen Fehlern in einem solchen Ausmaß auftreten, dass keine sinnvolle Interpretation der Daten mehr möglich ist. Derartige Messreihen werden dementsprechend vor der weiteren Auswertung aussortiert.

3.1.6. Ausreißer-Detektion und Filterung

Wie unter 3.1.4 und 3.1.5 beschrieben, kommt es vor, dass in einer Messreihe Ausreißer enthalten sind, welche ihren Ursprung in verschiedenen Fehlerquellen haben und nicht zum eigentlichen Ergebnis der Messungen beitragen. Dementsprechend wird die weitere Betrachtung der Messreihen erleichtert, wenn Ausreißer, soweit sie detektierbar sind, daraus entfernt werden. Extreme, offensichtlich unplausible Messwerte können leicht erkannt werden, wenn sie gewisse Schwellen überschreiten. So ist beispielsweise bei der Messung der transmittierten Signalamplitude durch eine Probe ein Wert weit oberhalb von 100% physikalisch unmöglich. Für die Erkennung von nicht ganz so extremen Ausreißer-Messwerten, die aber dennoch deutlich von der Mehrheit der Messwerte abweichen, bedarf es ausgefeilterer Verfahren.

Ein naheliegendes und anschaulich erklärbares Verfahren zur Ausreißer-Erkennung ist die sogenannte 3σ -Regel [164, Kap. 3]. Diese basiert auf der Annahme, dass Messwerte, die einer „normalen“ statistischen Streuung unterliegen, normalverteilt sein sollten, wohingegen Ausreißer nicht dieser Verteilung folgen. Als plausible Messwerte werden dabei diejenigen Messwerte angenommen, die in einer 3σ -Umgebung um den Mittelwert liegen. Im Fall von n Messwerten x_k werden also der Mittelwert \bar{x} und die Standardabweichung σ berechnet:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (x_k - \bar{x})^2}$$

Auf die einzelnen Messwerte x_k wird anschließend die folgende Regel angewendet [164, Kap. 3]:

$$|x_k - \bar{x}| > 3\sigma \Rightarrow x_k \text{ ist ein Ausreißer.}$$

Innerhalb der 3σ -Umgebung liegen bei normalverteilten Daten 99,7% aller Messwerte. Auf diese Weise bleiben also nahezu alle „wahren“ Messwerte unangetastet, während deutliche Ausreißer entfernt werden. Allerdings ist es bei der praktischen Anwendung der 3σ -Regel nahezu unvermeidbar, die Voraussetzung der Normalverteiltheit der Daten zu verletzen. Selbst dann, wenn die eigentlichen Messwerte normalverteilt sind, ist diese Voraussetzung nicht mehr gegeben, sobald Ausreißer hinzukommen, welche einer anderen Verteilung entstammen. Solange die Ausreißer noch nicht detektiert sind, gehen diese aber in die Berechnung von \bar{x} und σ mit ein. Anschließend werden also diese verfälschten Werten in die 3σ -Regel eingesetzt und wirken sich in ungewollter Weise auf die Erkennung der Ausreißer aus. Um die Ausreißer zuverlässig zu detektieren, müsste man also eigentlich \bar{x} und σ ohne den Einfluss der Ausreißer berechnen, was man aber nicht kann, solange man diese noch nicht detektiert hat.

Dieses Dilemma wird durch den Hampel-Test aufgelöst oder zumindest abgemildert. Dieser Test funktioniert ähnlich der 3σ -Regel, setzt aber an Stelle des Mittelwerts \bar{x} den Median x^\dagger ein, der gegenüber Ausreißern wesentlich robuster ist. An die Stelle der Standardabweichung tritt dabei der Median der absoluten Abweichung (engl. „median absolute deviation“) [164, Kap. 1]:

$$MAD = \text{median} \{ |x_k - x^\dagger| \}$$

Um den Hampel-Test in Analogie zur 3σ -Regel verwenden zu können, wird der skalierte Wert $S = 1,4826 MAD$ eingesetzt [164, Kap. 1]:

$$|x_k - x^\dagger| > 3S \Rightarrow x_k \text{ ist ein Ausreißer.}$$

Im Fall einer Zeitreihe, wie sie die Messreihen mit den Pflanzen darstellen, wäre es nicht sinnvoll, den Hampel-Test auf alle Messwerte der Zeitreihe auf einmal anzuwenden. Stattdessen wird auf Grundlage des Hampel-Tests der Hampel-Filter definiert [164, Kap. 4]. Aus n Messwerten wird dazu ein Fenster der Länge $2m + 1$ herausgegriffen, das für einen Wert x_k aus den Werten $x_{k-m}, \dots, x_k, \dots, x_{k+m}$ besteht. Auf Grundlage dieses Fensters wird der Hampel-Filter angewendet, um zu entscheiden, ob es sich bei x_k um einen Ausreißer handelt. Anschließend schreitet der Filter fort zum Wert x_{k+1} , um auch dort auf Grundlage eines um diesen Wert zentrierten Fensters der Länge $2m + 1$ den Hampel-Test anzuwenden. Bei Pearson [164, Kap. 4] werden so detektierte Ausreißer anschließend durch den Median der Werte im betrachteten Fenster ersetzt. Hier werden die Ausreißer allerdings aus den Zeitreihen entfernt und nicht durch künstliche Werte ersetzt.

Durch die Anwendung des Hampel-Filters wird die weitere Auswertung der Messreihen wesentlich erleichtert. Ein zusätzlicher Schritt, der für die weitere Auswertung nicht notwendig ist, der sich aber für die grafische Darstellung der Messreihen als nützlich erwiesen hat, ist die Anwendung eines zusätzlichen Glättungsfilters. Einen solchen Filter stellt der Savitzky-Golay-Filter dar [165]. Ein Vorteil dieses Verfahrens gegenüber anderen Glättungsfilters, wie beispielsweise der Glättung durch den gleitenden Mittelwert, ist, dass die Werte zwar geglättet werden, gleichzeitig aber

Eigenschaften wie lokale Minima und Maxima weniger verwaschen werden als bei anderen Verfahren [165]. Auch dieser Filter wird abschnittsweise auf ein um den gerade betrachteten Wert x_k zentriertes Fenster $x_{k-m}, \dots, x_k, \dots, x_{k+m}$ angewendet. An die Werte in diesem Fenster wird durch das Verfahren der kleinsten Fehlerquadrate ein Polynom des Grades l angepasst, wobei gelten muss $l \leq 2m$. Ein geglätteter Wert x'_k wird nun bestimmt, indem der Wert des gerade hergestellten Polynoms an der entsprechenden Stelle berechnet wird. Auch hier wandert das Fenster um den Wert x_k schrittweise einmal über die komplette Zeitreihe. In der üblichen Form des Savitzky-Golay-Filters wird angenommen, dass die als Stützstellen für das Polynom verwendeten Werte äquidistant seien. Das ist bei den hier vorliegenden Messreihen aber nicht der Fall. Auch wenn die zeitlichen Abstände zwischen den Messwerten ähnlich sind, sind sie nicht immer genau gleich. Dies liegt daran, dass die Messungen die bestimmenden Größen für den zeitlichen Abstand zwischen zwei Messungen an derselben Pflanze die Fahrzeiten des Goniometers und die Dauer der Messungen an den anderen Pflanzen sind. Aus diesem Grund werden hier für die Bestimmung des Ausgleichspolynoms und für die Berechnung des geglätteten Werts x'_k die tatsächlichen Zeitpunkte der Stützstellen $t_{k-m}, \dots, t_k, \dots, t_{k+m}$ verwendet.

Eine weitere Abweichung von der üblichen Form des Savitzky-Golay-Filters betrifft den Umgang mit den vom Hampel-Filter als Ausreißer identifizierten Messwerten. Diese werden hier nicht für die Bestimmung des Ausgleichspolynoms verwendet. Auf Grundlage der verbleibenden benachbarten Messwerte wird aber dennoch für die Zeitpunkte der Ausreißer jeweils ein geglätteter Wert bestimmt. Damit dieses Verfahren funktioniert, darf die Anzahl der Ausreißer in einem gegebenen Fenster nicht zu groß sein. Wenn a die Anzahl der Ausreißer in einem Fenster der Länge $2m+1$ ist, muss für die Bestimmung eines Ausgleichspolynoms des Grades l gelten: $l \leq 2m - a$.

Sowohl für den Hampel-Filter als auch für den Savitzky-Golay-Filter erfordern der Anfang und das Ende der Zeitreihe besondere Beachtung, da dort das betrachtete Fenster über die Enden der Zeitreihe hinausragt, was ohne gesonderte Behandlung dieses Falls nicht funktionieren kann. Um dieses Problem zu lösen, wird hier der folgende pragmatische Ansatz gewählt: Für die Anwendung der Filter wird die Zeitreihe an beiden Enden um m extrapolierte Werte ergänzt. Zur Berechnung dieser extrapolierten Werte wird an die ersten bzw. letzten $2m+1$ Messwerte ein Polynom desselben Grades angepasst, wie es auch anschließend für den Savitzky-Golay-Filter verwendet wird. Dem Anfang der Zeitreihe werden also auf Grundlage der Werte x_1, \dots, x_{2m+1} die Werte x_{-m}, \dots, x_0 hinzugefügt. Die Zeitpunkte t_{-m}, \dots, t_0 der interpolierten Werte werden äquidistant entsprechend dem mittleren Abstand der Zeitpunkte t_1, \dots, t_{2m+1} festgelegt. Mit dem Ende der Zeitreihe wird analog verfahren. Auch hier muss die oben genannte Bedingung dafür erfüllt sein, dass in den $2m+1$ Werten am Anfang und am Ende der Zeitreihe, die zur Bestimmung der Ausgleichspolynome verwendet werden, nicht zu viele Ausreißer enthalten sein dürfen. Die extrapolierten Werte werden nur zur Anwendung der Filter herangezogen, sind aber selbst nicht Teil des geglätteten Ergebnisses. Durch diese Sonderbehandlung der Enden der Zeitreihe kann der Effekt der Filterung an den Enden und auf dem dazwischenliegenden Hauptteil unterschiedlich ausfallen. Dies stellt hier kein Problem dar, da sich in den durchgeführten Experimenten die relevante Information im Hauptteil und nicht in den Enden der Messreihen befindet.

3.1.7. Messreihen im Überblick

Insgesamt wurden mit dem Versuchsaufbau 13 Trockenstressexperimente an Nutzpflanzen mit einer Dauer von jeweils zwei bis vier Wochen durchgeführt. In jedem Experiment wurden Messreihen von bis zu 15 Pflanzen gleichzeitig aufgezeichnet. Bei den untersuchten Arten von Nutzpflanzen handelt es sich um Roggen, Hafer, Weizen, Mais und Soja. Die verschiedenen Messreihen waren von den in Abschnitt 3.1.5 beschriebenen Artefakten unterschiedlich stark betroffen. Messreihen, die, wie dort unter Punkt 5 beschrieben, zu viele Fehler für eine Interpretation der Daten enthalten, werden, wie im Folgenden beschrieben, von der weiteren Auswertung ausgeschlossen.

Eine Gemeinsamkeit, die der Durchführung der Trockenstressexperimente zugrunde liegt, ist, dass die Pflanzen in allen Experimenten zu Anfang täglich bewässert wurden. Nach einigen Tagen wurde die Bewässerung eingestellt, so dass die Pflanzen durch das Austrocknen des Bodens dem sich nach und nach entwickelnden Trockenstress ausgesetzt wurden. In den meisten Fällen wurden die Pflanzen am Ende des Experiments wiederbewässert, um festzustellen, ob die untersuchten Blätter noch in der Lage waren, wieder Wasser aufzunehmen, oder den permanenten Welkepunkt bereits überschritten hatten. Nach der Wiederbewässerung wurden die Pflanzen für einige Tage regelmäßig bewässert, bevor das Experiment beendet wurde.

Im Folgenden werden die im einzelnen durchgeführten Trockenstressexperimente zunächst zusammenfassend beschrieben. Im Anschluss daran folgt die grafische Darstellung der Messdaten, wobei auf Besonderheiten einzelner Messreihen gesondert eingegangen wird. Unter 3.1.8 werden die Messreihen schließlich daraufhin untersucht, welche pflanzenphysiologischen Beobachtungen und Schlussfolgerungen sich daraus ziehen lassen.

Roggen: Mit Roggenpflanzen wurden insgesamt drei Trockenstressexperimente durchgeführt. In den ersten beiden Durchgängen wurden jeweils 15 Pflanzen unter Trockenstress gesetzt und anschließend wiederbewässert. Die Mehrzahl der untersuchten Blätter konnte sich nach der Wiederbewässerung erholen und wieder Wasser aufnehmen. Einzelne Blätter hatten den permanenten Welkepunkt zum Zeitpunkt der Wiederbewässerung bereits überschritten, die Pflanzen als Ganzes überstanden das Trockenstressexperiment aber ausnahmslos. Im dritten Messdurchgang wurden die Pflanzen aus dem zweiten Durchgang erneut untersucht. In diesem Fall blieb jedoch die Wiederbewässerung aus und alle Pflanzen vertrockneten vollständig. Artefakte der Art wie in Abschnitt 3.1.5 unter den Punkten 1, 2 und 3 beschrieben treten stellenweise auf, gefährden aber insgesamt nicht die Verwertbarkeit der Daten.

Hafer: Mit Haferpflanzen wurden zwei Trockenstressexperimente mit jeweils 15 Pflanzen durchgeführt. Ähnlich wie bei den beiden ersten Messdurchgängen mit Roggen wurden auch diese Pflanzen schließlich wiederbewässert und die untersuchten Blätter konnten sich in den meisten Fällen wieder erholen. Auch hier überlebten alle Pflanzen das Trockenstressexperiment. In den Messreihen des ersten der beiden Durchgänge fällt ein Abschnitt von etwa vier Tagen auf, der deutlich ein Artefakt entsprechend Punkt 3 zeigt. Dieser Abschnitt liegt glücklicherweise noch vor dem Beginn der Austrocknung der untersuchten

Blätter. Von den Messreihen des zweiten Durchgangs sind aufgrund von Artefakten und Messfehlern 2 Messreihen nicht verwertbar. Die verbleibenden 13 Messreihen zeigen Artefakte entsprechend den Punkten 1, 2 und 3 in deutlich sichtbarem, aber tolerablem Ausmaß.

Weizen: Im Fall von Weizen wurde ein Trockenstressexperiment mit insgesamt 15 Pflanzen durchgeführt. Auch hier folgte auf den Trockenstress die Wiederbewässerung, durch die sich die Pflanzen wieder erholten. Allerdings waren 8 der 15 Messreihen wie unter Punkt 5 beschrieben von so starken Messfehlern und Artefakten behaftet, dass sie keiner weiteren Auswertung zugänglich sind. Übrig bleiben 7 verwertbare Messreihen. Diese sind aufgrund der kleinen Anzahl allerdings nur noch für qualitative Betrachtungen nutzbar.

Mais: Mit Mais wurden vier Trockenstressexperimente mit jeweils 15 Pflanzen durchgeführt. Hier wurden die Pflanzen ebenfalls im Anschluss an den Trockenstress wiederbewässert, so dass für die Blätter, die den permanenten Welkepunkt noch nicht überschritten hatten, die Wiederaufnahme von Wasser ermöglicht wurde. Insgesamt sind die Daten der vier Messdurchgänge nur geringfügig von Artefakten beeinträchtigt. In den Messreihen des ersten Durchgangs traten in zwei Messreihen Sprünge der Messwerte entsprechend Punkt 4 auf. Ansonsten sind die Daten dieser Messreihen nahezu frei von Artefakten. Ein Teil der Messreihen des zweiten Durchgangs ist von Artefakten entsprechend Punkt 3 betroffen. Zwei Messreihen dieses Durchgangs mussten wegen gehäuften Artefakten und Messfehlern aussortiert werden. In den restlichen Messreihen traten vereinzelt Sprünge auf, die vermutlich einem Verrutschen des untersuchten Blattes entsprechend Punkt 4 zuzuschreiben sind. Die Messdaten des dritten Durchgangs enthalten nur vereinzelt Ausreißer entsprechend Punkt 1 und 2. In den Messdaten des letzten Messdurchgangs mit Maispflanzen sind Ausreißer entsprechend Punkt 1 in relativ großer Anzahl vorhanden, jedoch ist durch entsprechende Filterung der größte Teil der Messdaten dennoch verwertbar.

Soja: Mit Soja wurden drei Trockenstressexperimente mit jeweils 15 Pflanzen durchgeführt. Auch hier wurden die Pflanzen zunächst Trockenstress ausgesetzt, um sie anschließend wiederzubewässern. Von den Messreihen des ersten Durchgangs mussten 2 aufgrund von gehäuften Messfehlern entsprechend Punkt 5 aussortiert werden, zudem traten Artefakte entsprechend Punkt 2 auf. Die Messreihen des zweiten und dritten Durchgangs sind nur geringfügig von Artefakten entsprechend den Punkten 1, 2 und 3 betroffen. Im dritten Durchgang wurden an einem Teil der Pflanzen zusätzlich zu den Messungen mit dem THz-Spektrometer auch Messungen mit einem Gaswechsel-Messgerät nach dem unter 2.2.3 beschriebenen Prinzip durchgeführt, um die Austrocknung der Blätter zur Transpiration und zur Photosyntheserate der Pflanzen in Bezug setzen zu können.

Auf den folgenden Seiten werden die Messdaten der Langzeit-Messreihen grafisch aufbereitet dargestellt. Diese umfassende Darstellung soll dem Leser die Gelegenheit geben, sich selbst ein Bild von den Ergebnissen der Messreihen zu machen. Wer als Leser hauptsächlich an der pflanzenphysiologischen Interpretation der Daten

interessiert ist, kann die Lektüre jedoch auch direkt bei Abschnitt 3.1.8 auf Seite 81 fortsetzen.

Die folgenden Grafiken stellen das Ergebnis der Filterung der Messdaten, wie unter 3.1.6 beschrieben, dar. Außerdem wurden Messreihen, welche aufgrund gehäufte Artefakte und Messfehler nicht verwertbar sind, in der Darstellung ausgelassen. Eine vollständige Darstellung aller Messreihen mit allen hier herausgefilterten Ausreißer-Messwerten ist in Anhang A zu finden.

Allen folgenden Grafiken ist gemein, dass Tages- und Nachtzeiten, d.h. die Zeiten, zu denen die über dem Versuchsaufbau aufgehängte Natrium-Hochdruckdampfampe an- bzw. ausgeschaltet war, durch die Hintergrundfarbe der Plots dargestellt wird. Gelb bedeutet dabei Tag und grau bedeutet Nacht. In grün dargestellt sind die einzelnen Messwerte, aus denen, wie unter 3.1.6 beschrieben, durch den Hampel-Test auffällige Ausreißer entfernt wurden. Die darübergelegte rote Kurve stellt das Ergebnis des auf die Daten angewendeten Savitzky-Golay-Filters dar. Bei der Anwendung der Filter wurde eine Fensterbreite von $m = 10$ und für den Savitzky-Golay-Filter ein Polynomgrad von $l = 4$ verwendet. Die geglättete rote Kurve dient vor allem der grafischen Darstellung, während die weitere Auswertung in Abschnitt 3.1.8 auf den in grün dargestellten Messwerten basiert. Um die Lesbarkeit der Grafiken zu erleichtern, wurden die Plots so verschoben, dass diese sich nicht überlagern. Dazu wurden die einzelnen Messreihen mit Offsets versehen, welche an den jeweiligen Kurven angegeben sind. Die Nummerierung der Kurven gibt die Position an, an der die jeweilige Pflanze im Versuchsaufbau auf dem optischen Tisch stand. Bei Pflanzen, die unter Trockenstress gesetzt wurden, sind an den Plots zwei senkrechte schwarze Markierungen angebracht. Die erste Markierung gibt an, wann das Gewicht des jeweiligen Topfes einen bestimmten Schwellenwert unterschreitet. Die zweite Markierung gibt an, wann die Pflanze wiederbewässert wurde. In dem Fall, dass eine Pflanze während des Versuchs komplett austrocknen sollte und somit nicht wiederbewässert wurde, fehlt die zweite Markierung. Plots von Pflanzen, die durchgängig bewässert wurden, haben keine solchen Markierungen.

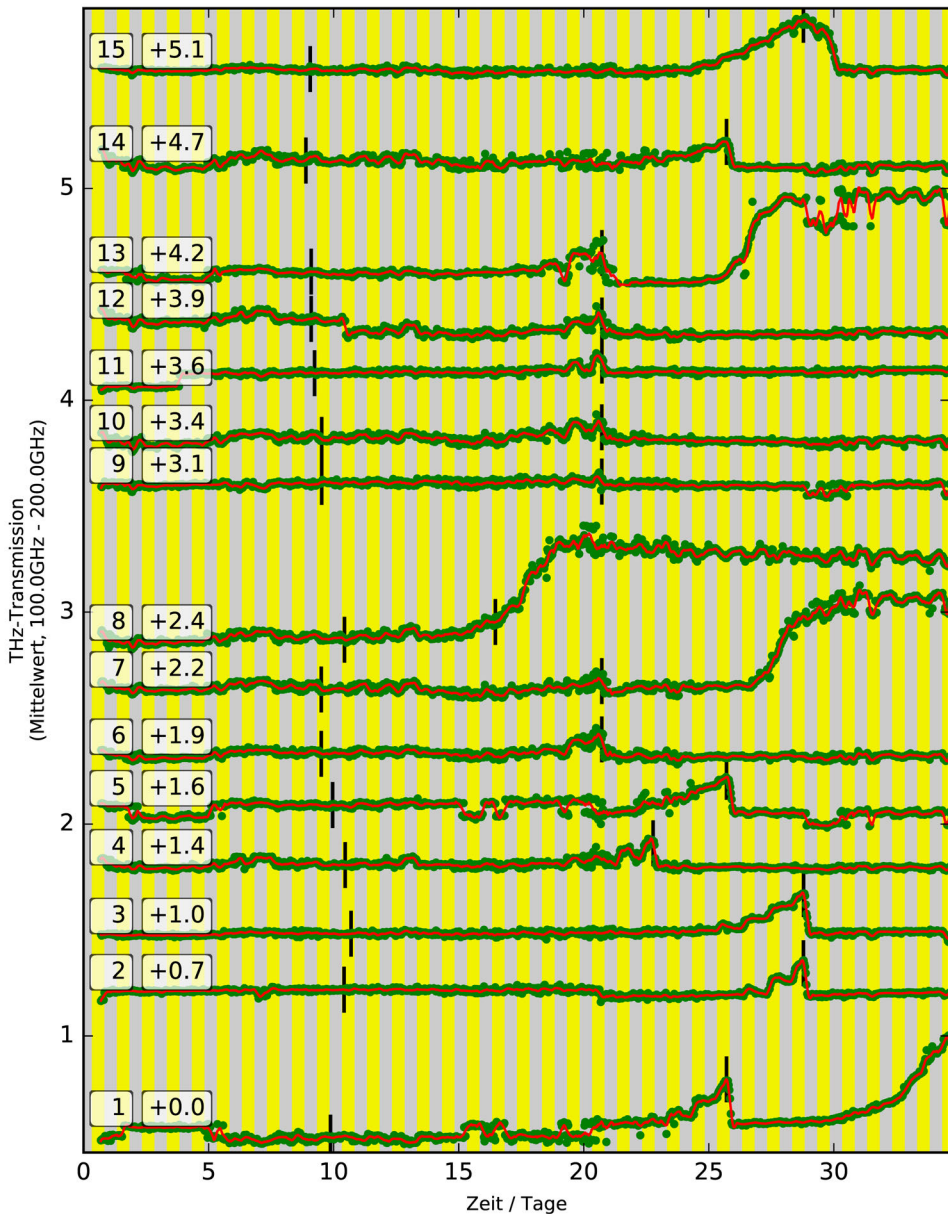


Abbildung 3.9.: Erstes Trockenstressexperiment mit Roggenpflanzen: Die Pflanzen wurden am 5. Versuchstag zum letzten Mal bewässert. Die erste der beiden jeweils an den Plots angebrachten Markierungen gibt den Zeitpunkt an, zu dem der Topf der jeweiligen Pflanze ein Gewicht von 230 g unterschritten hat. Die zweite Markierung gibt den Zeitpunkt der Wiederbewässerung an. Es ist deutlich zu erkennen, wie bedingt durch den Wassermangel die Transmission durch die untersuchten Blätter ansteigt und in den meisten Fällen nach der Wiederbewässerung zurück auf das ursprüngliche Niveau sinkt. Bei den in den Messreihen mit den Nummern 1, 2, 5, 9, 12 und 13 sichtbaren Sprüngen der Messwerte zwischen diskreten Niveaus handelt es sich wie in Abschnitt 3.1.5 unter Punkt 3 beschrieben um Artefakte.

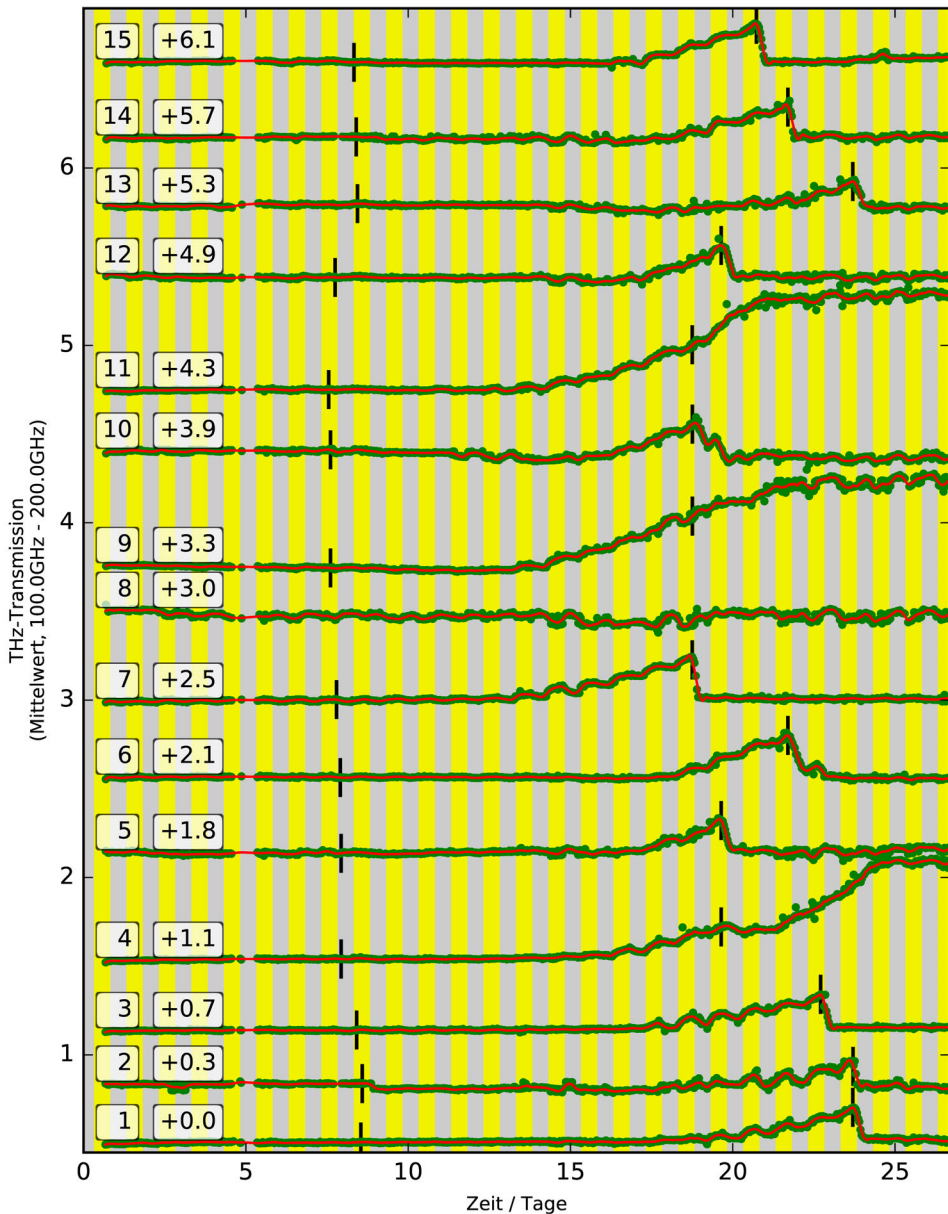


Abbildung 3.10.: Zweites Trockenstressexperiment mit Roggenpflanzen: Die letzte Bewässerung der Pflanzen erfolgte am 6. Versuchstag. Die Markierungen an den Plots geben die Zeitpunkte an, zu denen der jeweilige Topf ein Gewicht von 230g unterschritten hat, und zu denen die Pflanzen wiederbewässert wurden. Die Mehrzahl der untersuchten Blätter nimmt nach der Wiederbewässerung wieder Wasser auf, bis die transmittierte Signalamplitude wieder auf dem ursprünglichen Niveau ankommt. Die Pflanze mit der Nummer 8 wurde durchgängig bewässert.

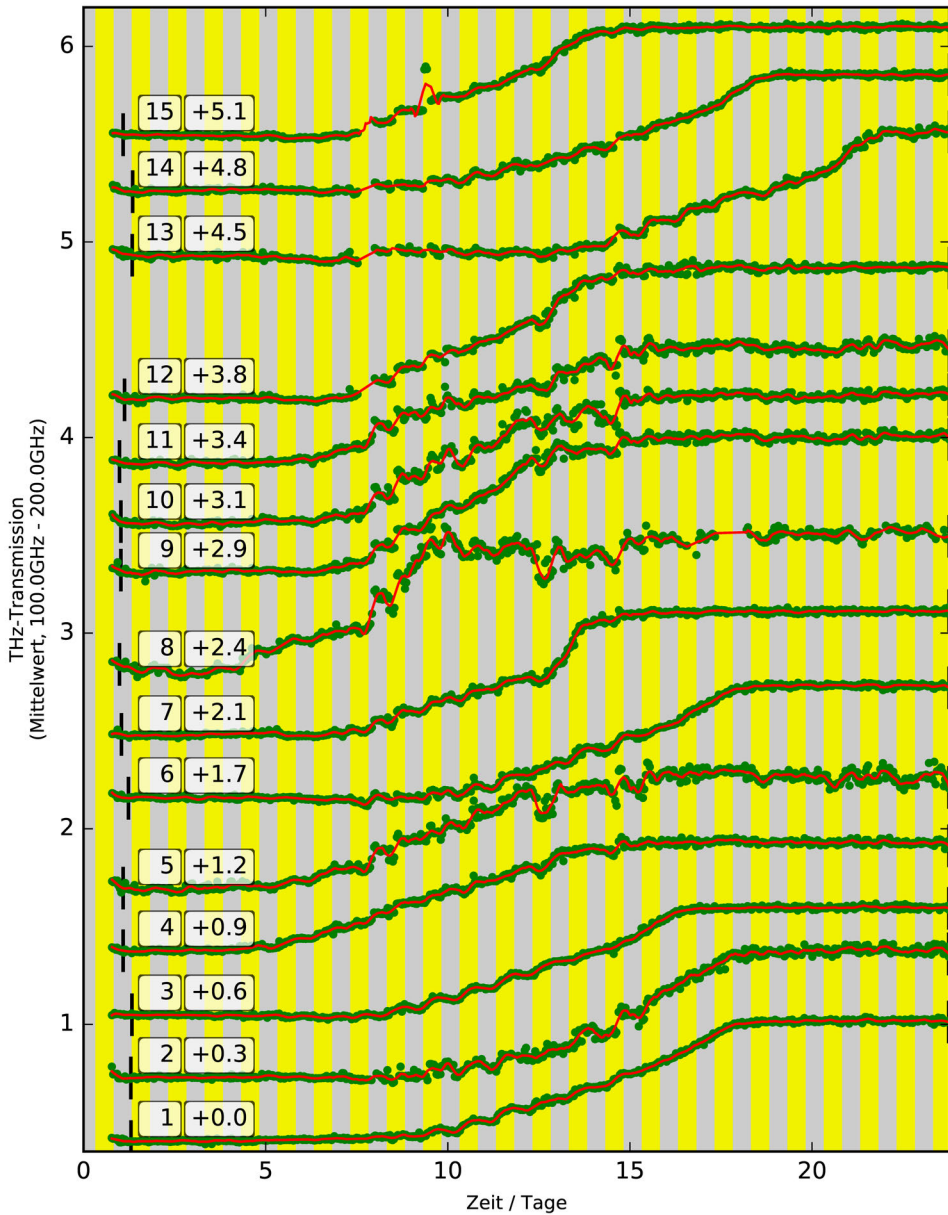


Abbildung 3.11.: Die Roggenpflanzen aus dem zweiten Trockenstressexperiment wurden ein weiteres Mal unter Trockenstress gesetzt. Die Markierung am Anfang der Messreihen zeigt den Zeitpunkt an, zu dem ein Topfgewicht von 230g unterschritten wurde. Die Pflanzen wurden nicht wiederbewässert, so dass sie komplett austrockneten. Teilweise sind die Kurven von Artefakten beeinträchtigt, die Austrocknung ist jedoch überall klar zu erkennen.

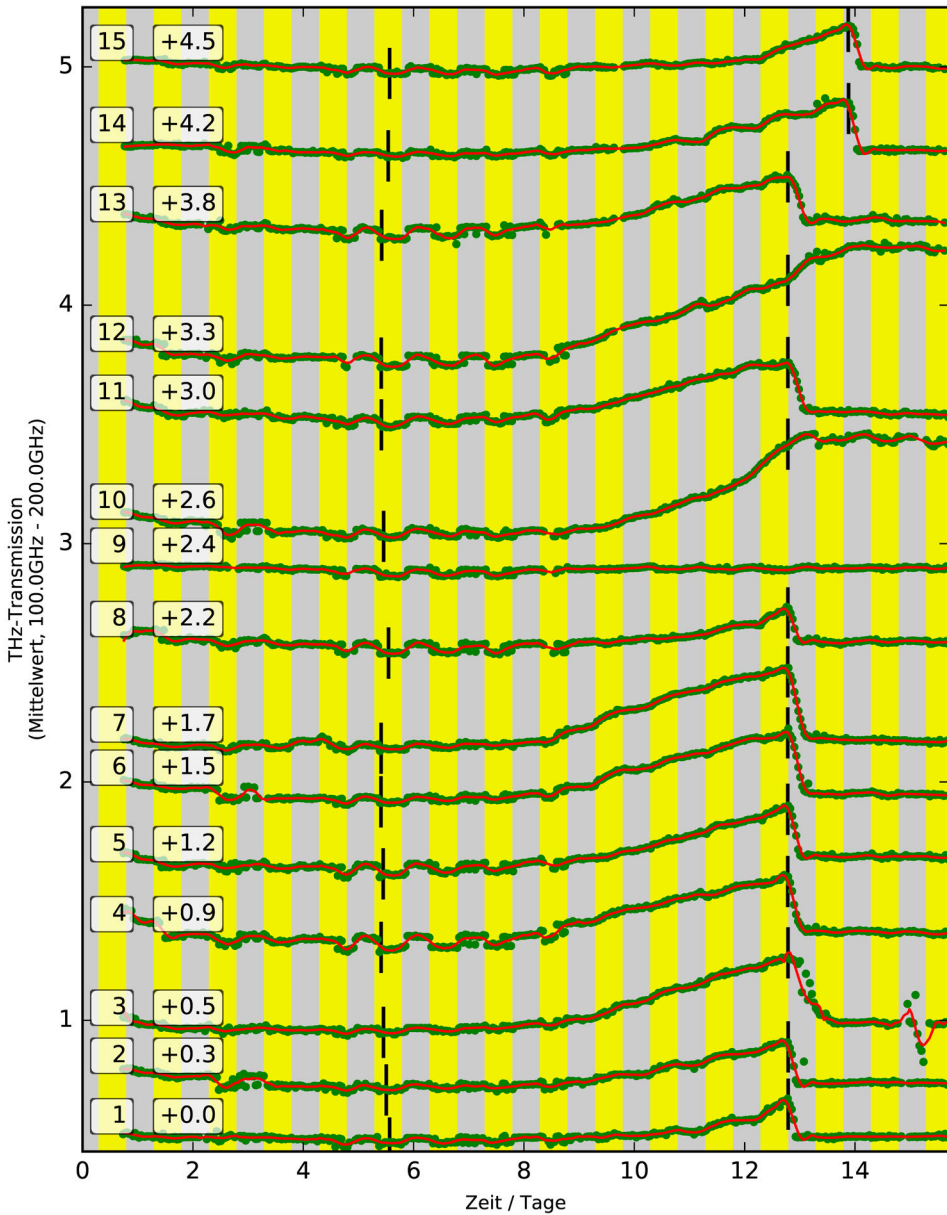


Abbildung 3.12.: Erstes Trockenstressexperiment mit Haferpflanzen: Die letzte Bewässerung erfolgte am 4. Versuchstag. Die Markierungen an den Plots geben die Zeitpunkte an, zu denen der jeweilige Topf ein Gewicht von 230g unterschritten hat, und zu denen die Pflanzen wiederbewässert wurden. Die Mehrzahl der untersuchten Blätter nimmt nach der Wiederbewässerung wieder Wasser auf, bis die transmittierte Signalamplitude wieder auf dem ursprünglichen Niveau ankommt. Die Pflanze mit der Nummer 9 wurde durchgängig bewässert. Vom 5. bis 9. Versuchstag sind Stufen in den Messdaten zu erkennen, die, wie in Abschnitt 3.1.5 unter Punkt 3 beschrieben, als Artefakte eingeordnet werden. Dafür, dass es sich bei diesen Stufen nicht um einen biologischen Effekt handelt, spricht neben ihrer abrupten Form auch, dass das Phänomen unabhängig davon, wie weit der Trockenstress der einzelnen Pflanzen fortgeschritten ist, in allen 15 Messreihen im selben Zeitraum auftritt.

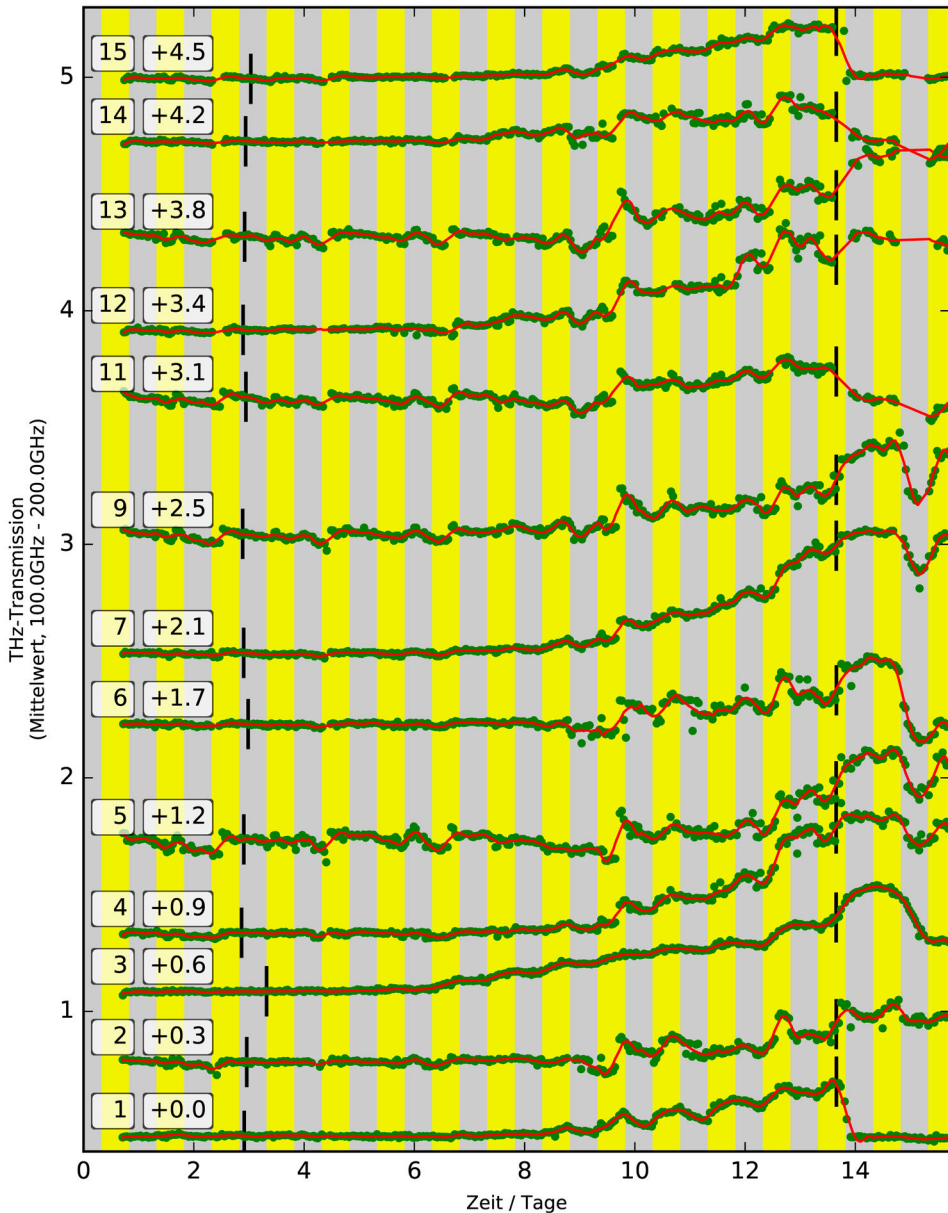


Abbildung 3.13.: Zweites Trockenstressexperiment mit Haferpflanzen: Die letzte Bewässerung erfolgte am 2. Versuchstag. Die Markierungen an den Plots geben die Zeitpunkte an, zu denen der jeweilige Topf ein Gewicht von 230g unterschritten hat, und zu denen die Pflanzen wiederbewässert wurden.

Einige der Messreihen sind von deutlich sichtbaren Artefakten beeinträchtigt. Besonders auffällig ist ein Sprung der Messwerte, der am 9. Versuchstag zum selben Zeitpunkt in 9 der Messreihen auftritt. Zudem nimmt in einigen Messreihen die Streuung der Messwerte gegen Ende des Experiments zu, so dass sich nicht immer klar sagen lässt, inwieweit ein Blatt sich vom Trockenstress erholt. Bei der weiteren Auswertung der Messdaten muss auf diese Unsicherheiten Rücksicht genommen werden.

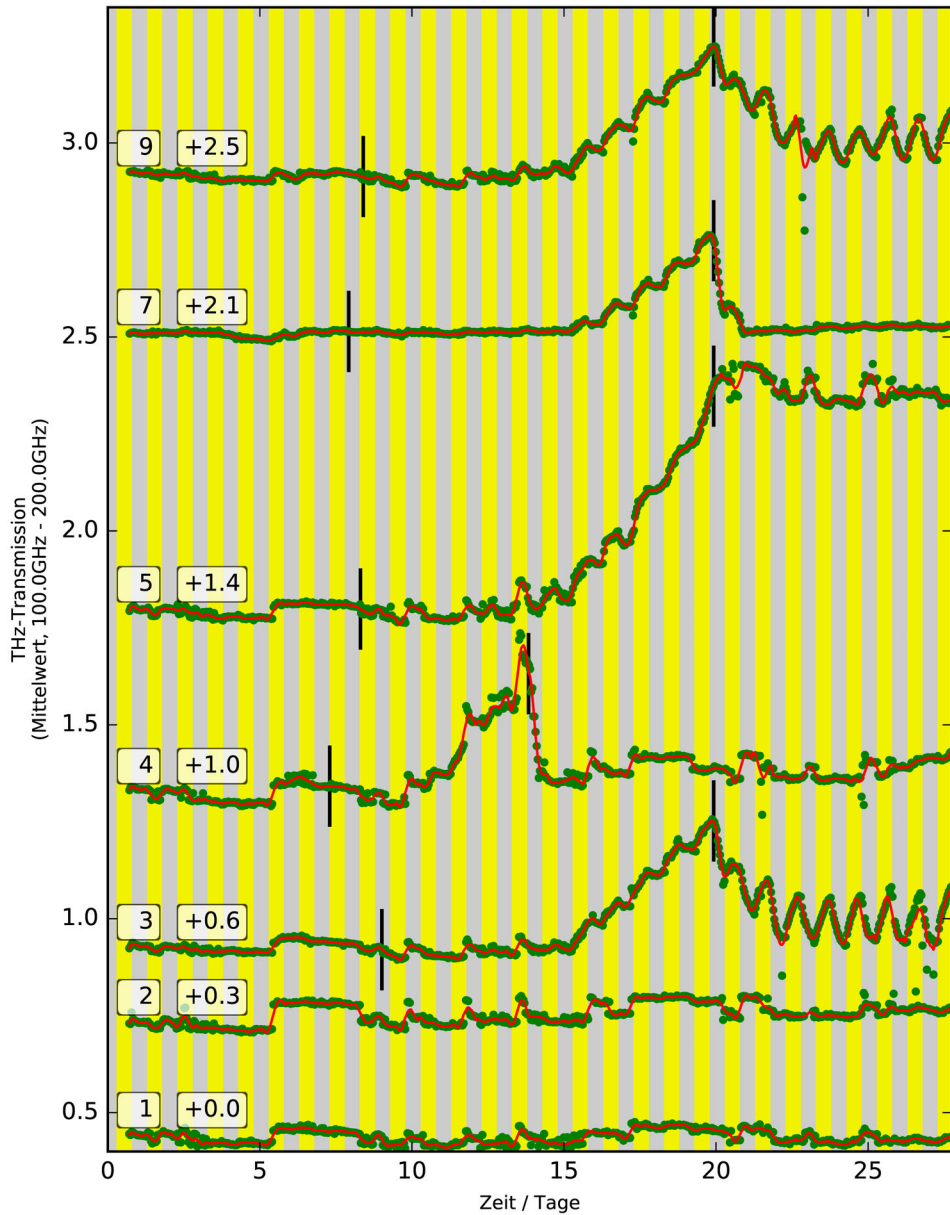


Abbildung 3.14.: Im Trockenstressexperiment mit Weizen-Pflanzen traten gehäuft Messfehler und Artefakte auf, so dass, wie in 3.1.5 unter Punkt 5 beschrieben, einige Messreihen nicht verwertbar sind. Die verbleibenden Messreihen sind hier dargestellt. Die letzte Bewässerung erfolgte am 5. Versuchstag. Die Markierungen an den Plots geben die Zeitpunkte an, zu denen der jeweilige Topf ein Gewicht von 230g unterschritten hat, und zu denen die Pflanzen wiederbewässert wurden. Die Pflanzen mit den Nummern 1 und 2 wurden durchgängig bewässert.

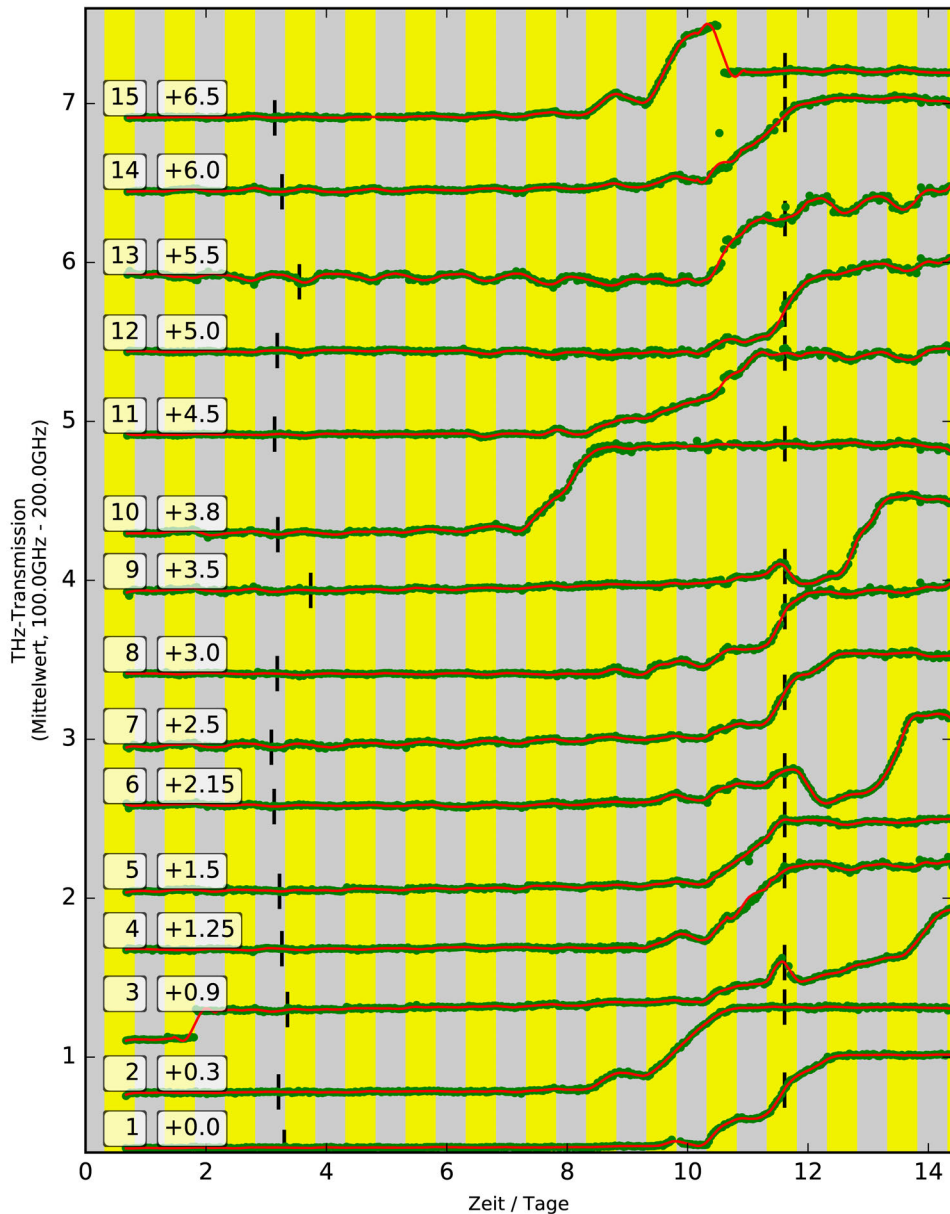


Abbildung 3.15.: Erstes Trockenstressexperiment mit Maispflanzen: Die letzte Bewässerung erfolgte am 2. Versuchstag. Die Markierungen an den Plots geben die Zeitpunkte an, zu denen der jeweilige Topf ein Gewicht von 230g unterschritten hat, und zu denen die Pflanzen wiederbewässert wurden. In diesem Experiment kam die Wiederbewässerung für die Mehrzahl der untersuchten Blätter zu spät, so dass diese vollständig austrockneten. Die Sprünge in den Messwerten am Anfang der 3. und am Ende der 15. Messreihe sind vermutlich auf ein Verrutschen der untersuchten Blätter zurückzuführen.

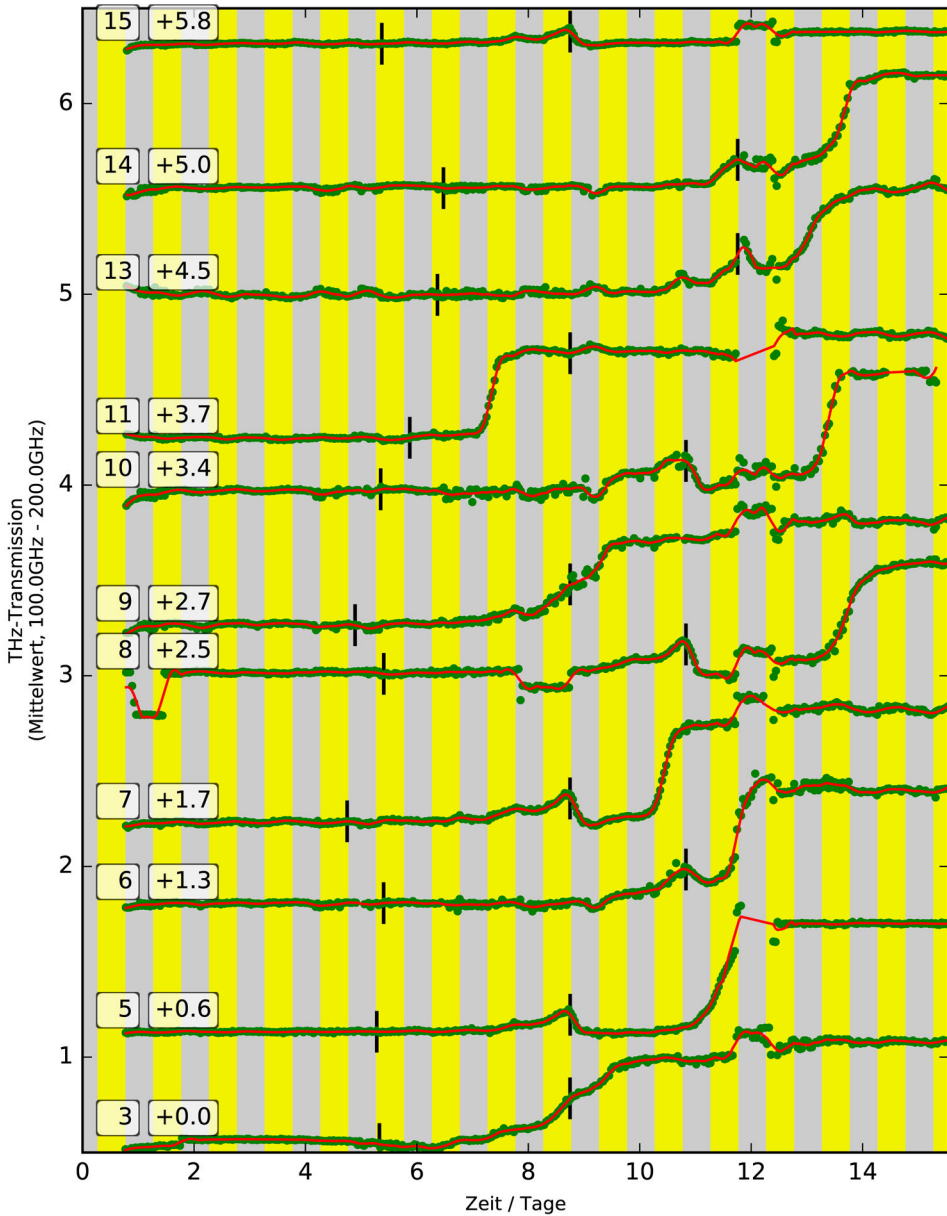


Abbildung 3.16.: Zweites Trockenstressexperiment mit Maispflanzen: Die letzte Bewässerung erfolgte am 2. Versuchstag. Die Markierungen an den Plots geben die Zeitpunkte an, zu denen der jeweilige Topf ein Gewicht von 230g unterschritten hat, und zu denen die Pflanzen wiederbewässert wurden. Auch hier kam die Wiederbewässerung für die Mehrzahl der untersuchten Blätter zu spät, so dass diese vollständig austrockneten. Vier der 15 Messreihen mussten, wie in Abschnitt 3.1.5 unter Punkt 5 beschrieben, wegen gehäuften Messfehlern und Artefakten aussortiert werden. In den verbleibenden Messreihen sind stellenweise Artefakte sichtbar, insbesondere Sprünge der Messwerte wie unter Punkt 3 beschrieben.

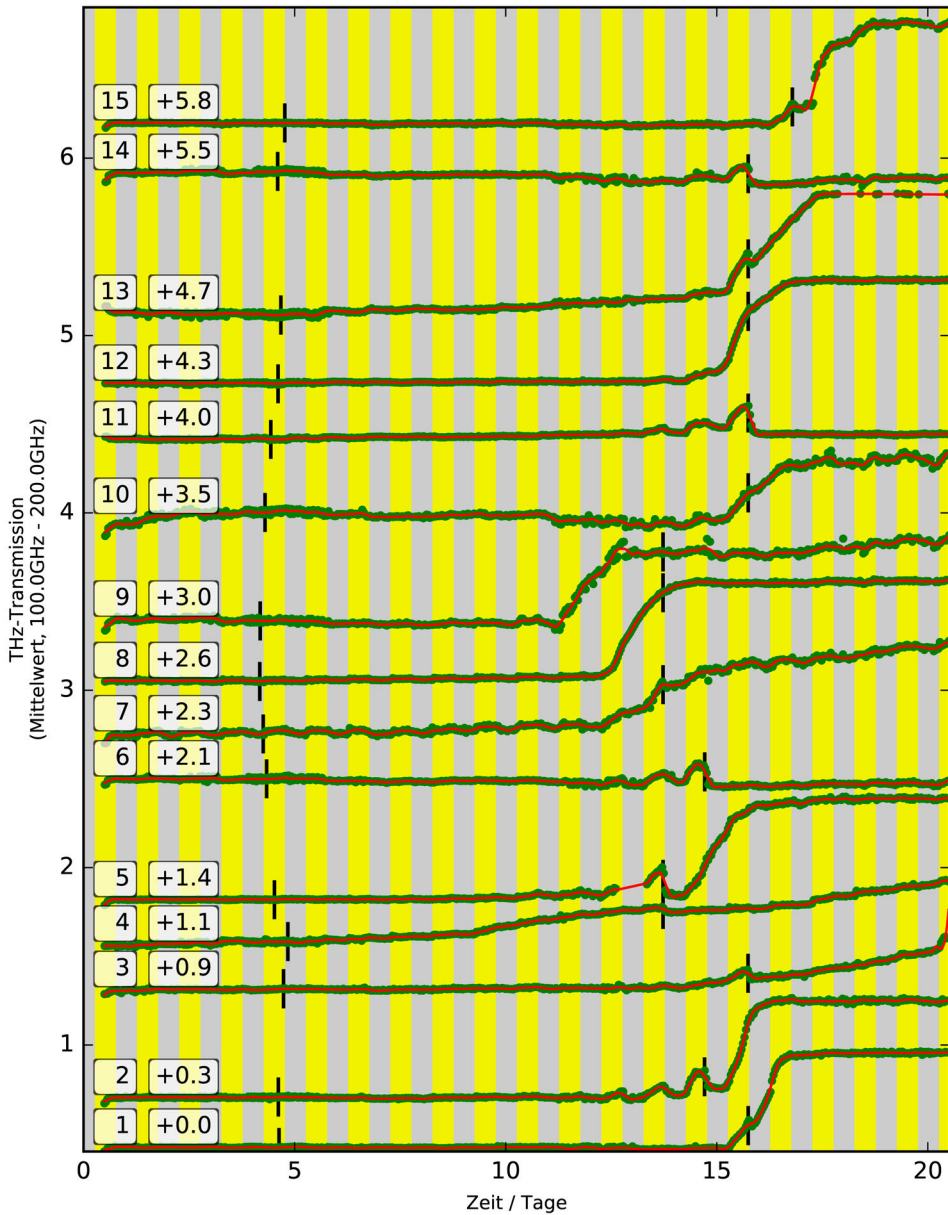


Abbildung 3.17.: Drittes Trockenstressexperiment mit Maispflanzen: Die letzte Bewässerung erfolgte am 2. Versuchstag. Die Markierungen an den Plots geben die Zeitpunkte an, zu denen der jeweilige Topf ein Gewicht von 230g unterschritten hat, und zu denen die Pflanzen wiederbewässert wurden. Auch hier kam die Wiederbewässerung für die Mehrzahl der untersuchten Blätter zu spät, so dass diese vollständig austrockneten. Die Messreihen sind nur geringfügig von Artefakten beeinträchtigt.

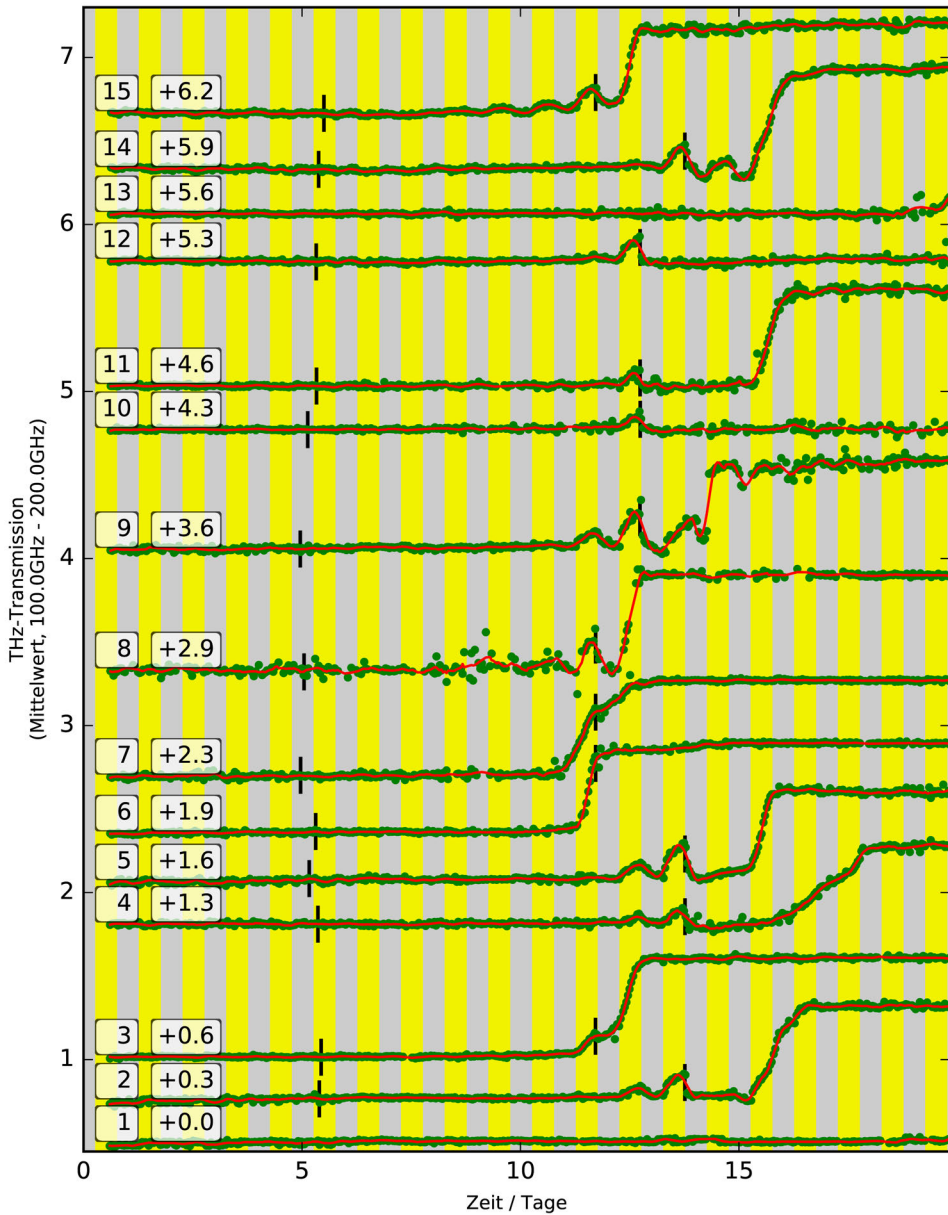


Abbildung 3.18.: Viertes Trockenstressexperiment mit Maispflanzen: Die letzte Bewässerung erfolgte am 3. Versuchstag. Die Markierungen an den Plots geben die Zeitpunkte an, zu denen der jeweilige Topf ein Gewicht von 230g unterschritten hat, und zu denen die Pflanzen wiederbewässert wurden. Die Pflanzen mit den Nummern 1 und 13 wurden durchgängig bewässert. Auch hier kam die Wiederbewässerung für die Mehrzahl der untersuchten Blätter zu spät, so dass diese vollständig austrockneten. Die Streuung der Messwerte bei einigen Messreihen, insbesondere Nr. 8, 9 und 10, ist vergleichsweise groß. Das Austrocknen der Blätter ist dennoch klar zu erkennen.

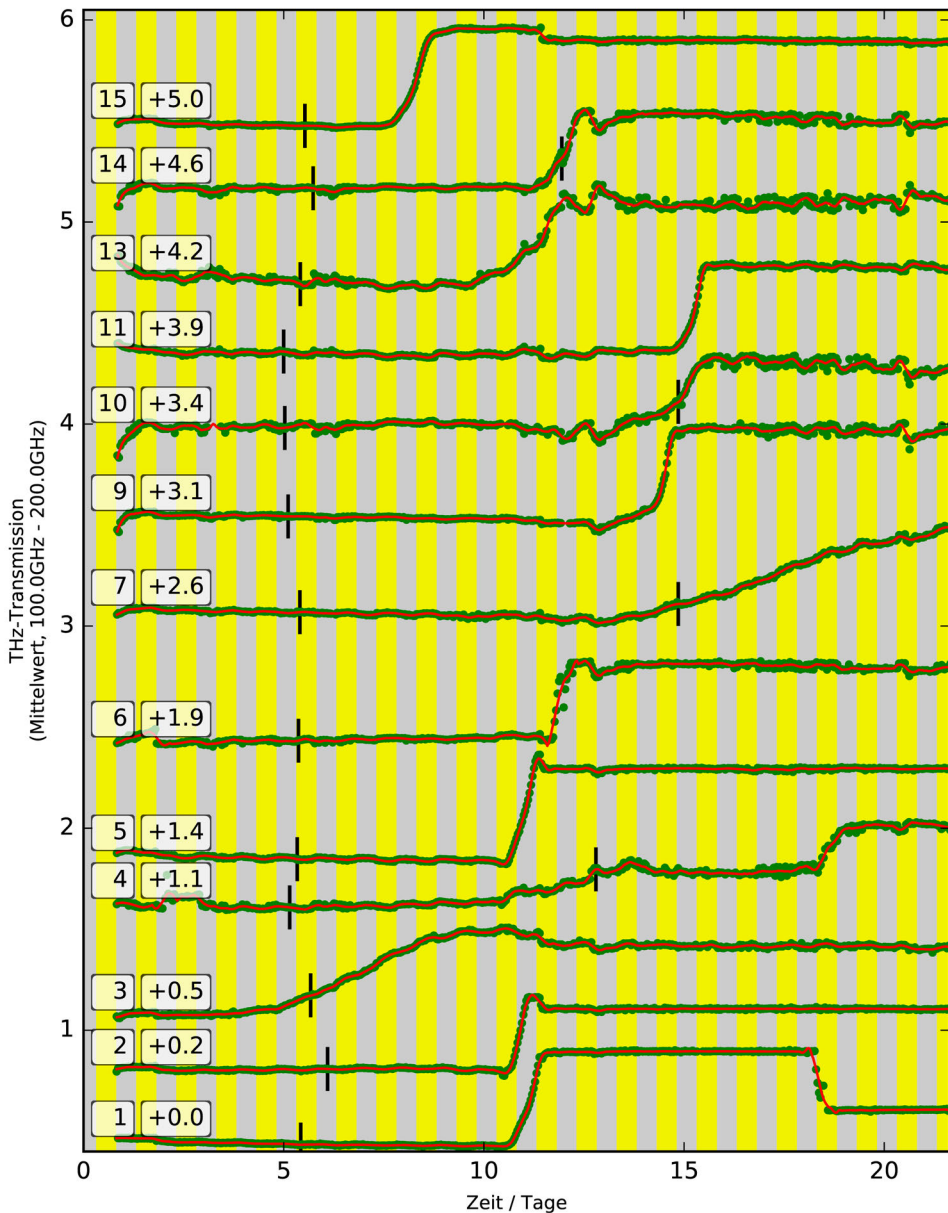


Abbildung 3.19.: Erstes Trockenstressexperiment mit Sojapflanzen: Die letzte Bewässerung erfolgte am 3. Versuchstag. Die senkrechten Markierungen geben den Zeitpunkt an, zu dem der Topf mit der jeweiligen Pflanze ein Gewicht von 230g unterschritten hat. Nur die Pflanzen mit den Nummern 4, 7, 10 und 14 wurden wiederbewässert, was aber für die betreffenden Blätter offensichtlich zu spät für eine Erholung war. Auch die Blätter der nicht wiederbewässerten Pflanzen trocknen erwartungsgemäß vollständig aus. Der große Sprung in den Messwerten der Messreihe mit der Nummer 1 gegen Ende des Experiments ist vermutlich durch ein Verrutschen des Blattes zu erklären. In einigen anderen Messreihen treten zudem Artefakte auf, welche in Abschnitt 3.1.5 unter den Punkten 1, 2 und 3 beschrieben werden.

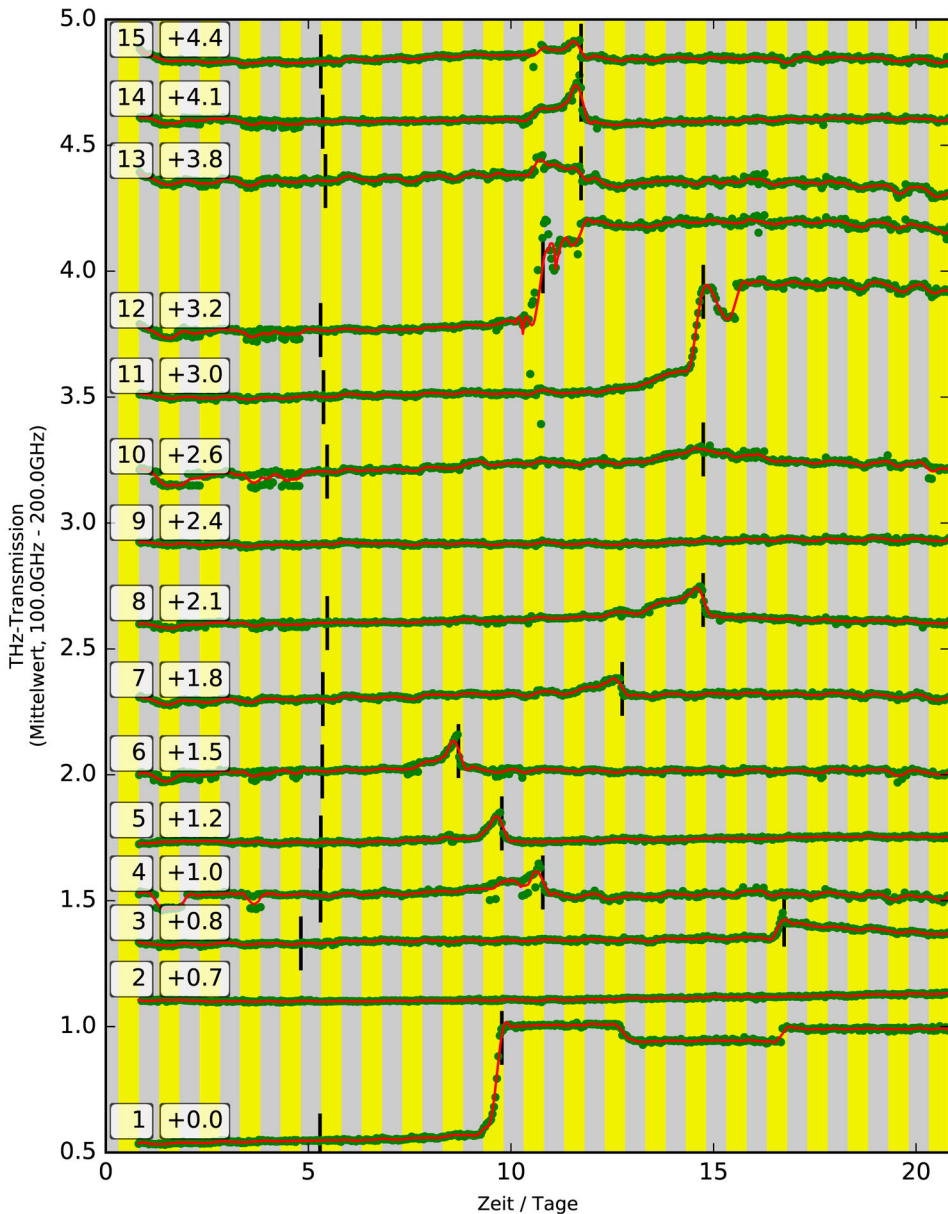


Abbildung 3.20.: Zweites Trockenstressexperiment mit Sojapflanzen: Die letzte Bewässerung erfolgte am 4. Versuchstag. Die Pflanzen stammen aus dem Botanischen Garten der Universität Marburg und befanden sich in etwas größeren Töpfen als die im Labor herangezogenen Pflanzen. Die erste Markierung an den Messdaten gibt deshalb das Unterschreiten eines Topfgewichts von 760g an. Die zweite Markierung gibt den Zeitpunkt der Wiederbewässerung an. Die Pflanzen mit den Nummern 2 und 9 wurden durchgängig bewässert. Vereinzelt treten Artefakte auf, welche Abschnitt 3.1.5 unter den Punkten 1, 2 und 3 beschrieben werden.

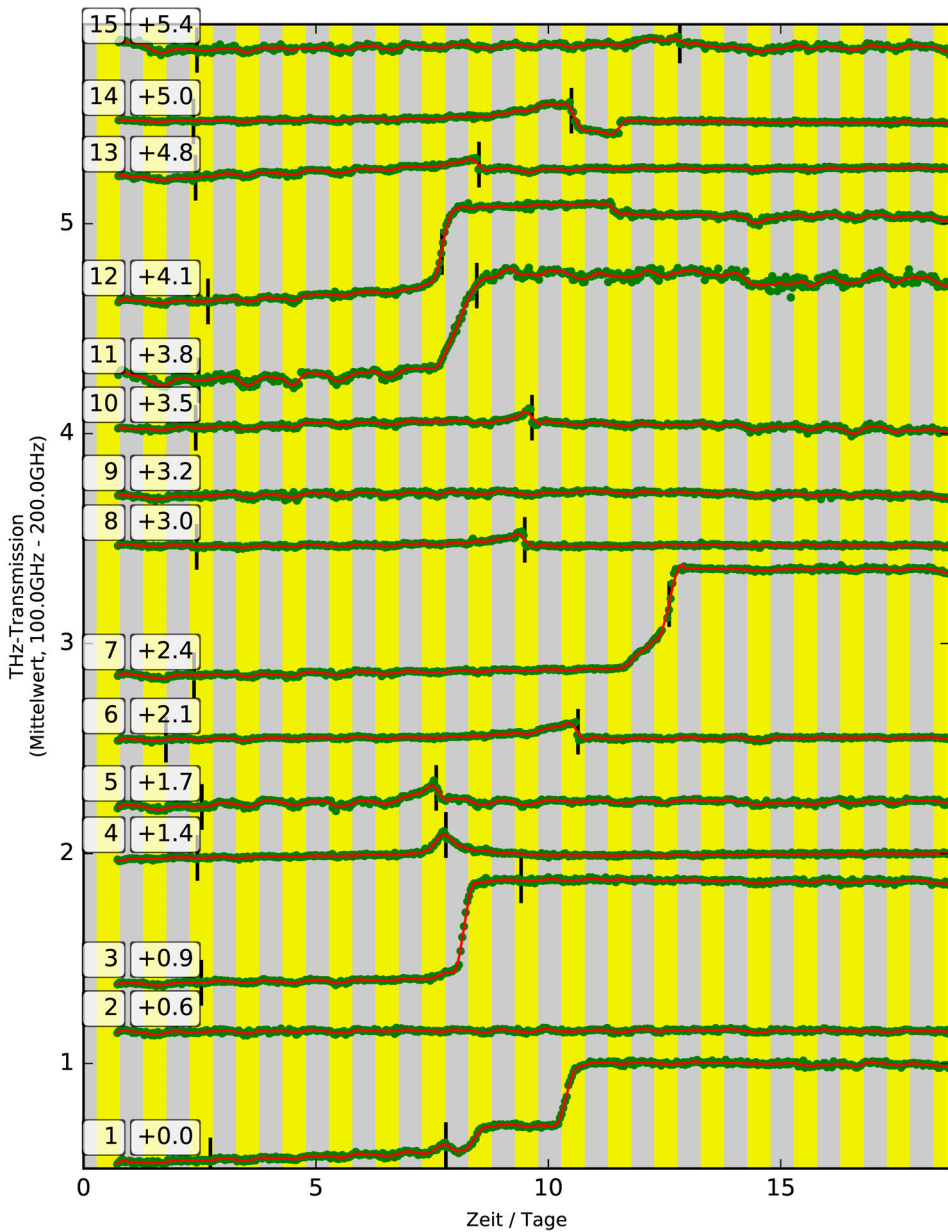


Abbildung 3.21.: Drittes Trockenstressexperiment mit Sojapflanzen: Auch diese Pflanzen stammen aus dem Botanischen Garten der Uni Marburg. Die Pflanzen wurden am 1. Versuchstag zum letzten Mal bewässert. Der Schwellenwert für die erste Markierung beträgt auch hier 760g. Die zweite Markierung gibt den Zeitpunkt der Wiederbewässerung an. Die Pflanzen mit den Nummern 2 und 9 wurden durchgängig bewässert. Vereinzelt treten Artefakte auf, welche in Abschnitt 3.1.5 unter den Punkten 1, 2 und 3 beschrieben werden.

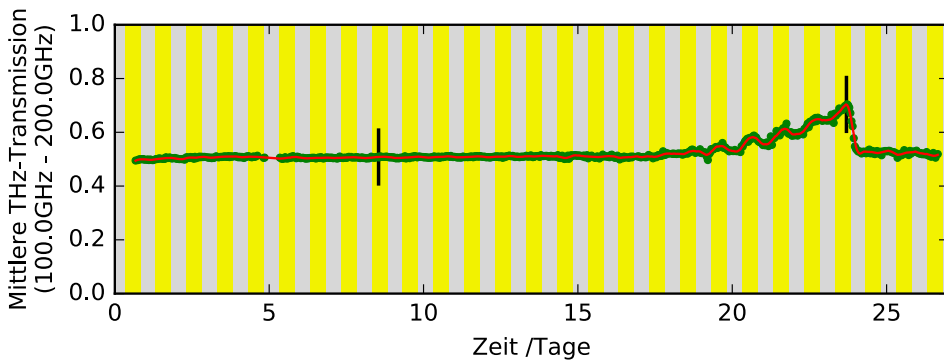


Abbildung 3.22.: Beispiel für eine Messreihe an einer Roggenpflanze. Das untersuchte Blatt verliert zunächst Wasser unter Trockenstress, erreicht aber nach der Wiederbewässerung wieder seinen ursprünglichen Wassergehalt. Während der Austrocknung treten Unterschiede im Wassergehalt zwischen Tag und Nacht auf, die zuvor nicht sichtbar waren. (Messreihe 1 in Abb. 3.10)

3.1.8. Pflanzenphysiologische Interpretation

Die grafische Darstellung der Ergebnisse der Messreihen auf den vorherigen Seiten zeigt, dass die Austrocknung eines Blattes unter Trockenstress und ggf. die Wasseraufnahme bei rechtzeitiger Wiederbewässerung mittels THz-Zeitbereichsspektroskopie erfasst werden können. Nun soll eine detailliertere Betrachtung und Interpretation dieser Ergebnisse folgen. Einerseits lassen sich einige typische, wiederkehrende Muster identifizieren, die im Folgenden als qualitative Beobachtungen diskutiert werden. Andererseits lassen sich aus den Messreihen auch quantitative Größen ableiten, welche die Trockenstressresistenz der untersuchten Pflanzen charakterisieren.

3.1.8.1. Qualitative Beobachtungen

Dass der Wasserverlust eines Blattes unter Trockenstress zu einem Anstieg der Amplitude der transmittierten THz-Strahlung führt, ist eine relativ offensichtliche Erkenntnis. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich aber, dass auch der zeitliche Verlauf der Messwerte interessante Details enthält. Solange eine Pflanze gut mit Wasser versorgt ist, kann man erwarten, dass der Blattwassergehalt und somit die transmittierte Signalamplitude weitgehend konstant bleibt. Dies ist auch in der hier als Beispiel herausgegriffenen Messreihe an einer Roggenpflanze in Abb. 3.22 der Fall. Zunächst wurde die Pflanze täglich bewässert. Die erste senkrechte Markierung gibt dort den Zeitpunkt an, zu dem die letzte Bewässerung erfolgte. Der weitere Verlauf der Kurve zeigt, dass der Blattwassergehalt auch bei ausbleibender Bewässerung zunächst konstant bleibt. Dies lässt sich zunächst einfach dadurch erklären, dass durch die regelmäßige Bewässerung im Topf der Pflanze ein gewisser Wasservorrat vorhanden ist, der zunächst noch aufgebraucht werden kann, bevor die Pflanze tatsächlich unter Trockenstress gerät. Zusätzlich lässt sich vermuten, dass bei beginnendem Trockenstress zunächst, wie unter 2.1.4.1 beschrieben, Abwehrreaktionen einsetzen, um den Wasserverlust hinauszuzögern. Ab einem gewissen Punkt ist die Austrocknung des Blattes aber nicht mehr zu verhindern, was dann als Anstieg der

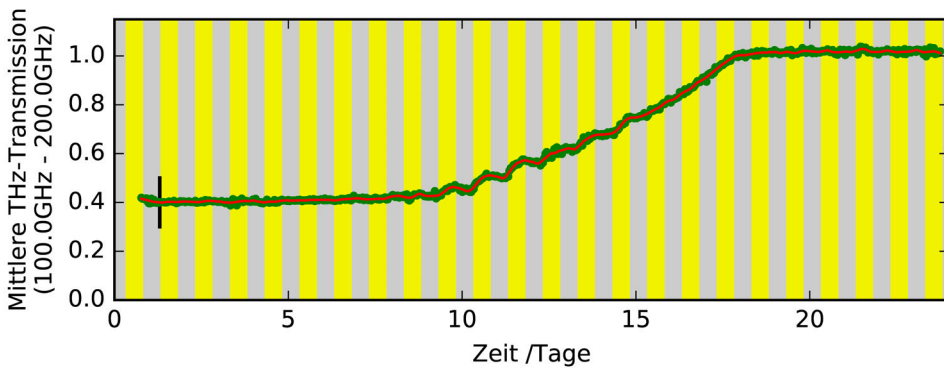


Abbildung 3.23.: Beispiel für eine Messreihe an einer Roggenpflanze, die nicht wiederbewässert wird und somit vollständig vertrocknet. Zu Beginn der Austrocknung sind auch hier Unterschiede zwischen Tag und Nacht erkennbar, die allerdings verschwinden, nachdem die Austrocknung eine gewisse Schwelle überschritten hat. (Messreihe 1 in Abb. 3.11)

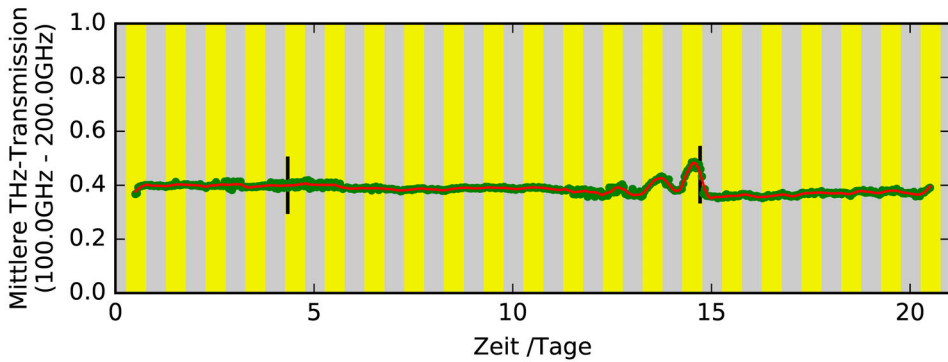
THz-Messwerte sichtbar wird. In der Messreihe in Abb. 3.22 fällt ein Muster auf, das sich unterschiedlich stark ausgeprägt in vielen anderen Messreihen wiederfinden lässt. Die mit dem Anstieg der Transmission verbundene Austrocknung des Blattes findet hauptsächlich tagsüber statt, d.h. während der in der grafischen Darstellung durch den gelben Hintergrund markierten Zeitabschnitte. Während der durch den grauen Hintergrund markierten Nacht kann das Blatt hingegen in geringem Umfang wieder Wasser aufnehmen, so dass die gemessene Transmission wieder ein kleines Stück weit fällt. Diese Beobachtung spricht dafür, dass die Wasserversorgung der Pflanze noch nicht komplett zum Erliegen gekommen ist, aber andererseits nicht mehr dafür ausreicht, den Wasserverbrauch des Blattes während des Tages auszugleichen. Nach der Wiederbewässerung, deren Zeitpunkt durch die zweite Markierung angegeben wird, fällt die Transmission durch das Blatt innerhalb weniger Stunden wieder auf dasselbe Niveau wie zu Beginn der Messreihe. Das Blatt erreicht also wieder seinen ursprünglichen Wassergehalt.

Auch Abb. 3.23 zeigt eine Messreihe an einem Blatt einer Roggenpflanze. Hier wurde jedoch auf die Wiederbewässerung verzichtet, so dass die Pflanze vollständig austrocknet. Nach der letzten Bewässerung der Pflanze, deren Zeitpunkt durch die senkrechte schwarze Markierung angegeben wird, ähnelt der Verlauf der Transmissionswerte zunächst der oben beschriebenen Messreihe aus Abb. 3.22. Auch hier bleiben die Messwerte zunächst noch für einige Tage auf einem konstanten Niveau, bevor das Blatt beginnt auszutrocknen und die gemessenen Transmissionswerte steigen. Zu Beginn der Austrocknung ist wieder zu beobachten, dass diese hauptsächlich tagsüber stattfindet und nachts sogar etwas rückläufig ist. Nachdem eine transmittierte THz-Amplitude von ca. 70% überschritten wird, ändert sich dieses Verhalten jedoch und das Blatt trocknet unabhängig von Tag und Nacht kontinuierlich aus, bis es vollständig vertrocknet ist und das THz-Signal nahezu vollständig transmittiert wird. Ein Anstieg der Transmission von 40% am Anfang der Messreihe auf 70% entspricht nach Gleichung 3.2 einer Austrocknung auf ca. 40% des ursprünglichen Wassergehalts. Nach Schopfer und Brennicke ist beim Unterschreiten eines relativen Wassergehalts von 50-60% mit dem Zelltod zu rechnen [31, Kap. 12]. Es kann

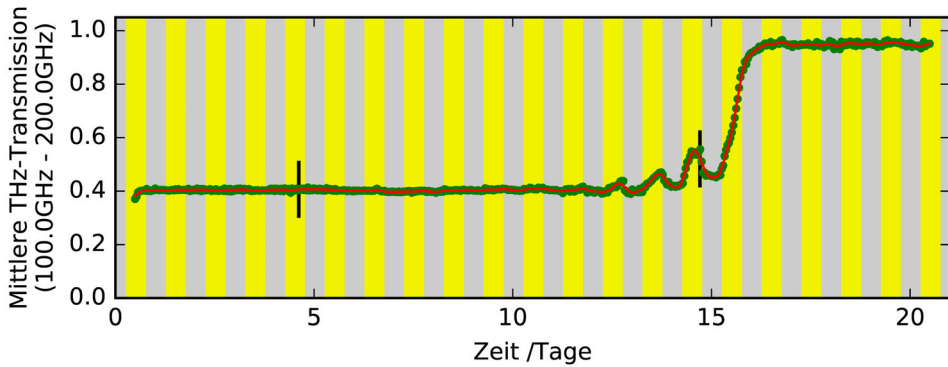
hier also davon ausgegangen werden, dass das Blatt nach dem Überschreiten dieser Schwelle im rein physikalischen Sinn weiter austrocknet ohne noch nennenswerte physiologische Aktivität zu zeigen.

Auch dann, wenn eine Pflanze wiederbewässert wird, kann es sein, dass sich das untersuchte Blatt nicht mehr vom Wasserverlust erholen kann, wenn dieser schon zu weit fortgeschritten ist. In diesem Fall schreitet die Austrocknung des Blattes trotz der Wiederbewässerung weiter fort, ähnlich wie in Abb. 3.23 bei ausbleibender Wiederbewässerung.

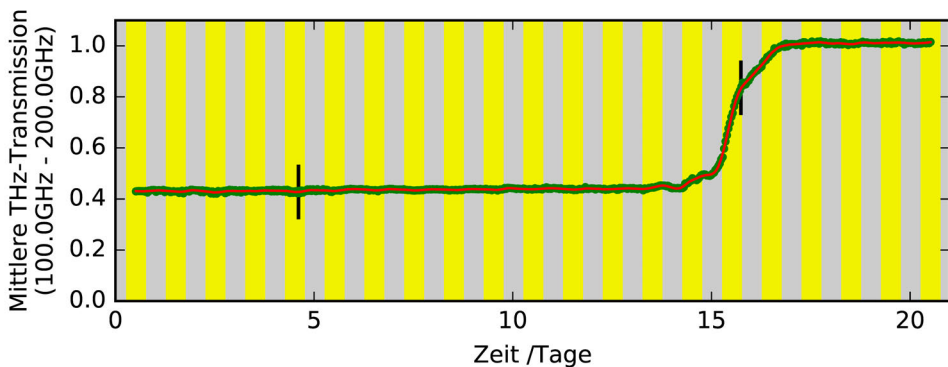
In den Messreihen mit den Maispflanzen trat in dieser Hinsicht ein Phänomen auf, das in dieser Form bei den anderen Pflanzen nicht zu beobachten war. Abb. 3.24a zeigt den Fall der vollständigen Erholung bei rechtzeitiger Wiederbewässerung bei einer Maispflanze, entsprechend der in Abb. 3.22 gezeigten Messreihe mit einer Roggenpflanze. Abb. 3.24c zeigt den ebenfalls erwartbaren Fall eines komplett austrocknenden Blattes bei zu später Wiederbewässerung. Ein unerwartetes Ergebnis stellt die Messreihe in Abb. 3.24b dar. Die Zeitpunkte der letzten Bewässerung vor der Austrocknung und der Wiederbewässerung sind auch hier durch zwei senkrechte schwarze Markierungen angegeben. Das untersuchte Blatt nimmt, wie die fallenden Transmissionswerte zeigen, nach der Wiederbewässerung, zunächst wieder etwas Wasser auf. Anschließend trocknet es aber innerhalb von ungefähr 24 Stunden doch noch vollständig aus. Die Wiederbewässerung hatte also noch einen kurzzeitigen Einfluss auf das Blatt, konnte dieses aber dennoch nicht mehr vor dem Vertrocknen retten. Anhand des Verhaltens nach der Wiederbewässerung lassen sich die mit den Maispflanzen aufgenommenen Messreihen also in drei Gruppen einteilen. Diese Einteilung wird unter 3.1.8.3 im Zuge einer quantitativen Auswertung der Messreihen nochmals betrachtet.



(a) Das betrachtete Blatt erholt sich nach der Wiederbewässerung vollständig. (Messreihe 6 in Abb. 3.17)



(b) Es erfolgt eine kurzzeitige Reaktion auf die Wiederbewässerung, aber letztlich trocknet das Blatt doch aus. (Messreihe 2 in Abb. 3.17)



(c) Die Wiederbewässerung erfolgt zu spät und die Austrocknung des Blattes schreitet fort. (Messreihe 12 in Abb. 3.17)

Abbildung 3.24.: Drei Beispiele für Messreihen an Maispflanzen und für den typischen Verlauf der Transmissionswerte in Abhängigkeit von der Wiederbewässerung.

3.1.8.2. Vergleich von Roggen und Hafer

Eine wichtige Eigenschaft für die Trockenstressresistenz einer Pflanze ist die Fähigkeit, den Blattwassergehalt auch bei schlechter Wasserversorgung der Wurzel aufrecht zu erhalten, so dass es möglichst nicht zu den unter 2.1.4.2 beschriebenen Abbauerscheinungen kommt. Diese Fähigkeit kann bei verschiedenen Pflanzenarten unterschiedlich stark ausgeprägt sein, was hier am Beispiel der mit Roggen- und Hafer-Pflanzen durchgeführten Messreihen im Vergleich demonstriert werden soll. Dazu soll die Austrocknung der untersuchten Blätter in Bezug gesetzt werden zum Gewicht des Topfes, das ein Maß ist für die Wassermenge, die der Pflanze zur Verfügung steht. Zu diesem Zweck wird im Folgenden zunächst eine Methode vorgestellt, mittels derer in reproduzierbarer Weise aus den Messreihen der Zeitpunkt bestimmt werden kann, zu dem die Austrocknung des Blattes beginnt. Anschließend werden die so bestimmten Werte daraufhin untersucht, ob ein statistisch nachweisbarer Unterschied zwischen Roggen und Hafer vorliegt.

Für die Auswertung der Messreihen wird der ausgewertete Zeitraum zunächst auf ein vereinheitlichtes Zeitfenster festgelegt. Dieses Zeitfenster beginnt mit dem Unterschreiten eines Topfgewichts von 230 g und endet mit der Wiederbewässerung der jeweiligen Pflanze. In den Abbildungen 3.9, 3.10, 3.12 und 3.13 wird dieses Zeitfenster durch die Markierungen an den Plots dargestellt. In diesem Zeitfenster soll nun der Zeitpunkt bestimmt werden, zu dem die Transmission der THz-Strahlung durch das Blatt beginnt zu steigen, bzw. zu dem die Zunahme der Transmission eine definierte Schwelle überschreitet. Wie unter 2.1.4.1 und 2.1.4.2 beschrieben ist die Austrocknung eines Blattes insgesamt wesentlich komplizierter als die Austrocknung einer unbelebten Probe. Aus diesem Grund werden hier nun nur diejenigen Messwerte zur Auswertung herangezogen, die tagsüber aufgenommen wurden. Auf diese Weise werden Schwankungen zwischen Tag und Nacht ausgeblendet, so dass sich die Austrocknung des Blattes durch ein sehr einfaches empirisches Modell beschreiben lässt. Dieses einfache Modell besteht aus einer logistischen Funktion, die in geeigneter Weise verschoben und skaliert wird, um sie an die Messwerte anzupassen:

$$t_{THz}(t) = \frac{a}{e^{-1 \cdot (b \cdot t + c)} + 1} + d$$

Die vier Parameter a , b , c und d können durch numerische Anpassung der Kurve an die Messwerte so bestimmt werden, dass die resultierende Funktion den Anstieg der THz-Transmission durch das Blatt beschreibt. Den Parametern kommt dabei keine direkte inhaltliche Bedeutung zu, sondern sie dienen nur dazu, die beiden Kurven zur Deckung zu bringen. Die Form der Funktion trägt der Tatsache Rechnung, dass der Anstieg der Transmission zunächst einer Exponentialfunktion ähnelt, früher oder später aber an eine Obergrenze stößt. Die Verwendung der angepassten Kurve für die weitere Auswertung hat den Vorteil, dass das Ergebnis so weniger von kurzzeitigen Schwankungen und einzelnen Ausreißern beeinflusst wird. Abb. 3.25 zeigt ein Beispiel für die Anpassung der Funktion an die Daten aus einer Messreihe mit einer Haferpflanze. Anhand der angepassten Funktion und Gleichung (3.2) kann der Zeitpunkt bestimmt werden, zu dem die Zunahme der Transmission durch das Blatt einer Abnahme des Blattwassergehalts um einen bestimmten Betrag entspricht. Als Schwelle wird hier eine Abnahme des Blattwassergehalts um 10% verwendet. Als Ergebnis der Auswertung wird hier angegeben, wie lange es nach dem Unterschreiten

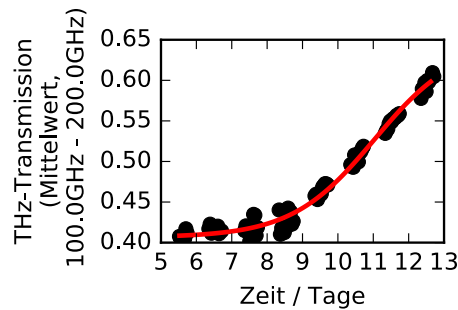
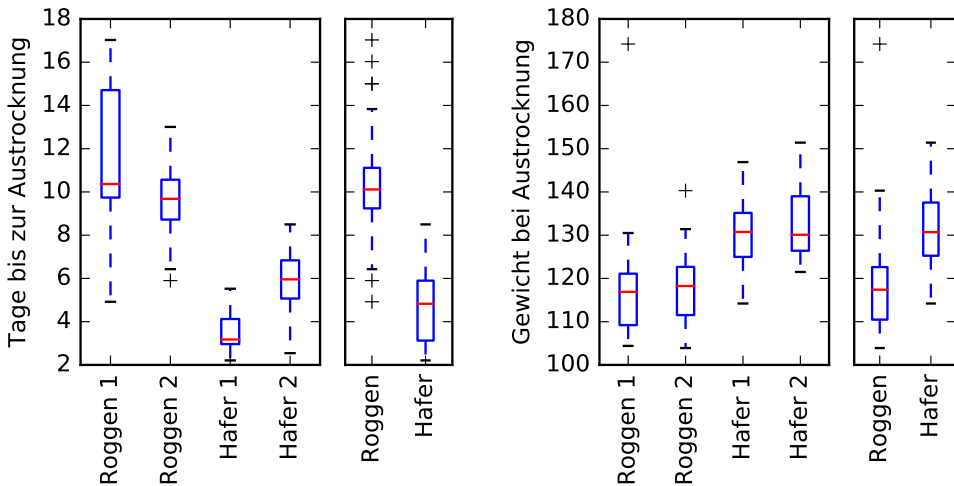


Abbildung 3.25.: Beispiel für das Anfitzen einer logistischen Funktion an die Austrocknung eines Blattes einer Haferpflanze (Vgl. Messreihe 2 in Abb. 3.12)

des Schwellenwerts von 230 g für das Topfgewicht dauert, bis die Transmission die 10%-Schwelle überschreitet. Außerdem wurde auch das Gewicht bestimmt, das die jeweiligen Töpfe zu diesem Zeitpunkt hatten. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Abb. 3.26 dargestellt. Darin enthalten sind die in den Abbildungen 3.9, 3.10, 3.12 und 3.13 dargestellten Messreihen, sofern die jeweilige Pflanze unter Trockenstress stand. Die zur Kontrolle durchgängig bewässerten Pflanzen sind nicht Teil der Auswertung, da bei diesen erwartungsgemäß keine Austrocknung und somit kein Anstieg der Transmission feststellbar war. Zudem wurde auch in Messreihe 9 bis zum Zeitpunkt der Wiederbewässerung nicht die hier verwendete 10%-Schwelle erreicht. Die Verteilung der aus den Messreihen ermittelten Werte für die Zeitverzögerung bis zum Beginn der Austrocknung zeigt eine dahingehende Tendenz, dass die Roggenpflanzen dem Trockenstress um einige Tage länger standhalten konnten als die Haferpflanzen. Gleichzeitig sind aber auch zwischen den Messdurchgängen mit der jeweils gleichen Getreideart Unterschiede sichtbar, was sich insbesondere bei den Messreihen mit den Haferpflanzen zeigt. Ein sehr viel klareres Bild zeigt die Auswertung des Topfgewichts. Hier zeigen sich in den Experimenten mit den gleichen Getreidearten jeweils sehr ähnliche Werte für das Gewicht der Töpfe, bei dem die Austrocknung der untersuchten Blätter beginnt. Gleichzeitig ist zwischen den beiden Getreidearten ein deutlicher Unterschied dieser Werte erkennbar.

Auch das dritte Trockenstressexperiment mit Roggenpflanzen (Abb. 3.11) wurde auf dieselbe Art und Weise ausgewertet, was eine mittlere Zeitverzögerung bis zur 10%-Schwelle der Austrocknung von 5,9 Tagen und ein mittleres Topfgewicht von 123g zu diesem Zeitpunkt ergab. Die Zeitverzögerung weicht also deutlich von den beiden vorherigen Messreihen ab, während das Topfgewicht wieder einen ähnlichen Wert annimmt. Dieses Ergebnis spricht dafür, dass die Geschwindigkeit der Austrocknung durch weitere hier nicht erfasste Umstände beeinflusst werden kann, während letztendlich das Topfgewicht, bzw. der Wassergehalt des Bodens, darüber entscheidet, bis zu welchem Punkt die Pflanzen ausreichend mit Wasser versorgt sind. In den statistischen Vergleich zwischen Roggen und Hafer geht dieses dritte Trockenstressexperiment nicht ein, da es sich um dieselben Pflanzen handelt, die auch im vorhergegangenen Experiment unter Trockenstress standen. Es kann also nicht ausgeschlossen werden, dass in den Pflanzen Adaptionsprozesse stattgefunden haben, die einen Vergleich mit „frischen“ Pflanzen nicht mehr erlauben.

Eine Aussage darüber, ob der in der grafischen Darstellung sichtbare Unterschied



(a) Zeitverzögerung bis zum Beginn der Austrocknung der untersuchten Blätter
links: Messreihen einzeln, rechts: insgesamt
(b) Topfgewicht, bei dem die Austrocknung beginnt
links: Messreihen einzeln, rechts: insgesamt

Abbildung 3.26.: Die Zeitverzögerung bis zum Beginn der Austrocknung lässt im Vergleich von Roggen und Hafer die Tendenz erkennen, dass die untersuchten Roggenpflanzen dem Wassermangel um einige Tage länger standhalten konnten. Gleichzeitig sind aber insbesondere im Fall von Hafer auch zwischen den beiden Messdurchgängen mit im Prinzip gleichen Pflanzen deutliche Unterschiede erkennbar. Die Auswertung des Topfgewichts zeigt ein klareres Bild, in dem die Messreihen mit der gleichen Getreideart jeweils sehr ähnliche Ergebnisse zeigen, während sich die beiden Arten deutlich voneinander unterscheiden. Eine Erklärung des Boxplot als grafische Darstellungsform findet sich in Anhang B.

zwischen Roggen und Hafer statistische Signifikanz besitzt, lässt sich mittels des Kolmogorow-Smirnow-Tests treffen. Dieser Test dient dazu, festzustellen, ob zwei Stichproben derselben Wahrscheinlichkeitsverteilung entstammen, oder ob es sich um zwei verschiedene Verteilungen handelt. Wenn ersteres der Fall sein sollte, wären etwaige Unterschiede zwischen den beiden Stichproben nur zufällig entstanden, wohingegen im Fall von zwei verschiedenen Verteilungen ein tatsächlicher, statistisch signifikanter Unterschied vorliegt. Der Kolmogorow-Smirnow-Test setzt dabei nicht die Normalverteiltheit der Daten voraus, was insbesondere bei kleinen Stichprobengrößen von Vorteil ist. Für diese statistische Untersuchung werden hier für Roggen und Hafer jeweils die Daten aus beiden Messdurchgängen zusammengefasst. Die Lage und die Streubreite der Daten sind jeweils im rechten Teil von Abb. (3.26a) und 3.26b dargestellt. Die durch die Rechtecke dargestellte Lage der inneren Quartile lässt einen deutlichen Unterschied erwarten. Das Einsetzen der Daten in den Kolmogorow-Smirnow-Test bestätigt sowohl im Fall der Zeitverzögerung als auch im Fall des Topfgewichts mit einer Fehlerwahrscheinlichkeit von unter 1%, dass zwischen den Verteilungen der Messwerte von Roggen und Hafer tatsächlich ein Unterschied besteht.

Zusammenfassend lässt sich also festhalten, dass die THz-Zeitbereichsspektroskopie dazu geeignet ist, Unterschiede in der Trockenstressresistenz verschiedener Pflan-

zenarten, bzw. allgemein verschiedener Gruppen von Pflanzen, messtechnisch zu erfassen.

3.1.8.3. Bewässerungszeitpunkt von Mais

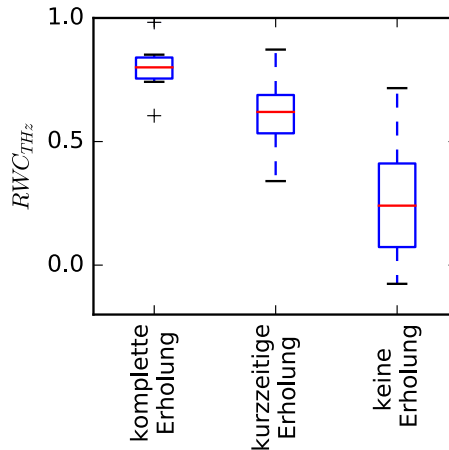


Abbildung 3.27.: Relativer Wassergehalt der untersuchten Blätter an den Maispflanzen zum Zeitpunkt der Wiederbewässerung. Die Klassifizierung in die drei Gruppen erfolgte anhand der weiteren Entwicklung der Messwerte nach der Wiederbewässerung, die zeigt, ob das Blatt wieder Wasser aufnimmt und ob es sich dauerhaft erholt, oder ob es im weiteren Verlauf doch noch austrocknet. (Darstellung als Boxplot, vgl. Anhang B)

Wenn sich die Austrocknung eines Blattes in einem messbaren Anstieg der THz-Transmission zeigt, steht das Blatt bereits unter Trockenstress und wird nur noch eine begrenzte Zeit lang überleben, wenn die Pflanze nicht wieder besser mit Wasser versorgt wird. Ob sich das untersuchte Blatt nach der Wiederbewässerung noch erholen kann und wieder einen gesunden Wasserstatus erreicht, hängt davon ab, wie weit der Trockenstress zu diesem Zeitpunkt bereits fortgeschritten war. Es liegt die Vermutung nahe, dass die vollständige Erholung um so unwahrscheinlicher ist, je weiter das Blatt bereits ausgetrocknet ist.

Entsprechend Gleichung (3.3) kann der Wassergehalt des austrocknenden Blattes als relativer Wassergehalt ermittelt werden, der sich auf den Wassergehalt des gesunden Blattes zu Anfang des Experiments bezieht. Hier wird auf diese Weise der relative Wassergehalt der untersuchten Blätter zum Zeitpunkt der Wiederbewässerung bestimmt. Dazu wird als Wert für die THz-Transmission durch das gesunde Blatt der Mittelwert der letzten 36 Stunden vor der letzten Bewässerung der Pflanze verwendet. Für die Bestimmung des Transmissionswerts für den Zeitpunkt der Wiederbewässerung ist eine Mittelwertbildung über einen längeren Zeitraum nicht geeignet, da die Transmission durch das austrocknende Blatt nicht als konstant angenommen werden kann, sondern zunächst steigt und zumindest in dem Fall, dass das Blatt nach der Wiederbewässerung wieder Wasser aufnimmt, anschließend abrupt abfällt. Andererseits beträgt der zeitliche Abstand zwischen zwei THz-Messwerten ca. eine Stunde und der Zeitpunkt der Wiederbewässerung ist unabhängig von den

Zeitpunkten der THz-Messungen. Aus diesem Grund wird für den Transmissionswert zum Zeitpunkt der Wiederbewässerung ein interpolierter Wert bestimmt. Für die Berechnung dieses interpolierten Wertes wird an die THz-Messwerte in einem Zeitfenster von ± 3 Stunden um die Wiederbewässerung ein Polynom 2. Grades angepasst.

Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Abb. 3.27 dargestellt. Wie unter 3.1.8.1 dargestellt, können die an den Maispflanzen aufgenommenen Messreihen anhand der Reaktion auf die Wiederbewässerung in drei Gruppen eingeteilt werden. Eine vollständige Erholung des untersuchten Blattes nach der Wiederbewässerung ist mit hoher Wahrscheinlichkeit dann gegeben, wenn sein relativer Wassergehalt einen Wert von ca. 75% nicht unterschreitet. Unterhalb dieses Wertes erholt sich die Mehrheit der untersuchten Blätter höchstens kurzzeitig. Unterhalb eines relativen Wassergehalts von 50% bei der Wiederbewässerung ist auch eine kurzzeitige Erholung unwahrscheinlich.

3.1.8.4. Bewässerungszeitpunkt von Soja

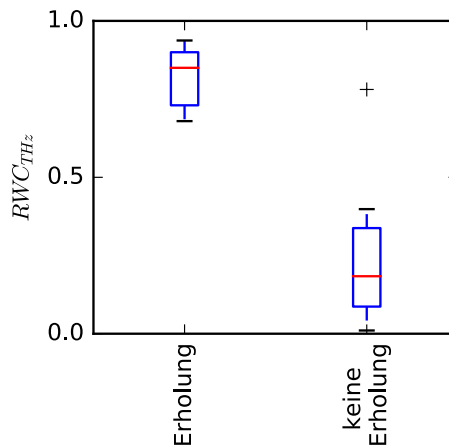


Abbildung 3.28.: Relativer Wassergehalt der untersuchten Blätter an den Sojapflanzen zum Zeitpunkt der Wiederbewässerung. Die Klassifizierung in die zwei Gruppen erfolgte anhand der weiteren Entwicklung der Messwerte nach der Wiederbewässerung, die zeigt, ob das Blatt wieder Wasser aufnimmt und ob es sich dauerhaft erholt, oder ob es im weiteren Verlauf doch noch austrocknet. (Darstellung als Boxplot, vgl. Anhang B)

Abhängig davon, ob sich das untersuchte Blatt nach der Wiederbewässerung erholt oder nicht, lassen sich die Messreihen der Sojapflanzen in zwei Gruppen einteilen. Der Fall, dass sich ein Blatt - so wie bei einigen der Maispflanzen - zunächst kurzzeitig erholt und dann doch noch vertrocknet, tritt hier in dieser Form nicht auf, so dass diese dritte Gruppe entfällt. In derselben Weise wie oben beschrieben wird auch hier der relative Wassergehalt des Blattes zum Zeitpunkt der Wiederbewässerung bestimmt, wobei der Wassergehalt kurz vor der letzten Bewässerung als Bezugspunkt für den Wassergehalt des gesunden Blattes dient. Die Verteilung der so bestimmten Messwerte für die beiden Gruppen findet sich in Abb. 3.28. Im Ergebnis zeigt sich auch hier, dass sich die Blätter im Fall einer Wiederbewässerung bei einem relativen

Wassergehalt von mindestens 75% mit hoher Wahrscheinlichkeit vom Trockenstress erholen können. Wenn ein relativer Blattwassergehalt von 50% unterschritten wird, kann hingegen nicht mehr mit einer Erholung des Blattes gerechnet werden.

3.1.8.5. Vergleich von THz-Messungen und Photosynthesemessungen

Im dritten Trockenstressexperiment mit Sojapflanzen wurden an einigen der Pflanzen neben den THz-Messungen auch Messungen der Photosyntheserate und der Transpiration durchgeführt. Für diese Messungen kam ein Messgerät vom Typ LI-6400XT der Firma LiCor zum Einsatz. Es handelt sich dabei um ein Gaswechselsmesssystem, das nach dem unter 2.2.3 beschriebenen Funktionsprinzip mittels Infrarot-Gasdetektoren die Aufnahme bzw. Abgabe von CO_2 und Wasserdampf durch das untersuchte Blatt erfasst. Anders als bei den Messungen mit dem THz-Spektrometer, die automatisiert abliefen und somit ein kontinuierliches Bild des Blattwassergehalts zeichnen, musste das Photosynthese-Messsystem für die Messungen von Hand an den zu untersuchenden Blättern platziert werden. Es konnte deshalb über den größten Teil des untersuchten Zeitraums nur jeweils ein Messwert für Photosynthese und Transpiration pro Pflanze und Tag aufgenommen werden. Um die Auswirkungen der Wiederbewässerung genauer zu erfassen, wurde für diese zusätzlich zu den täglichen Einzelmessungen über einen Zeitraum von mehreren Stunden mit dem Photosynthese-Messsystem Messwerte aufgezeichnet. Bei der Interpretation der so entstandenen Messreihen und dem Vergleich mit den THz-Messungen ist zu beachten, dass die Messungen mit den verschiedenen Messverfahren zwar an derselben Pflanze aber nicht am selben Blatt aufgezeichnet wurden. Wie auch bei den THz-Messungen wurde aber auch bei den Messungen mit dem Photosynthese-Messsystem ein Blatt festgelegt, das jeden Tag wieder für die Messungen verwendet wurde. Trockenstress und Austrocknung müssen nicht notwendigerweise an allen Blättern einer Pflanze genau synchron ablaufen. Dennoch erlauben die beiden Messreihen eine Gegenüberstellung der beiden Messverfahren, die sowohl Gemeinsamkeiten als auch Unterschiede in ihren jeweiligen Fähigkeiten aufzeigt.

Die Abbildungen 3.29, 3.30, 3.31 und 3.32 zeigen Messreihen von Sojapflanzen, die sich bei der Wiederbewässerung wieder erholt haben. Es ist klar zu erkennen, dass unter Trockenstress sowohl die Photosyntheserate als auch die stomatäre Leitfähigkeit bis auf Werte nahe Null zurückgehen. Dies entspricht dem unter 2.1.4.1 beschriebenen zu erwartenden Verhalten von Pflanzen unter Trockenstress. Dabei ist zu beobachten, dass der Trockenstress sich in den Messungen mit dem Photosynthese-Messsystem tendenziell etwas früher in einer sichtbaren Änderung der Messwerte niederschlägt als dies bei der THz-Transmission der Fall ist. Insbesondere in Abb. 3.29 und 3.30 ist deutlich zu erkennen, dass die stomatäre Leitfähigkeit schon sehr früh nach der letzten Bewässerung zu sinken beginnt. Der durch die THz-Transmission angegebene Blattwassergehalt bleibt zunächst weitgehend konstant. Dies lässt sich so interpretieren, dass die Verschlechterung des Wasserangebots zunächst durch eine Verringerung der Transpiration ausgeglichen wird. Je näher die stomatäre Leitfähigkeit ihrem Minimum kommt desto weniger hilft dieser Mechanismus dabei, den Blattwassergehalt aufrecht zu halten, was sich schließlich im Anstieg der THz-Transmission zeigt. Wenn die stomatäre Leitfähigkeit einen Wert von Null erreicht, bedeutet dies, dass die Stomata vollständig geschlossen sind. Das Blatt kann aber dennoch weiter austrocknen, da auch bei geschlossenen Stomata seine Oberfläche

immer noch eine gewisse Durchlässigkeit besitzt. Um dennoch einen Messwert angeben zu können, der sich allein auf die stomatäre Leitfähigkeit bezieht, werden in der internen Datenverarbeitung des Photosynthese-Messsystems die beiden Größen anhand einer Schätzung für die Durchlässigkeit der Blattoberfläche voneinander getrennt [166].

Tendenziell lässt sich beginnender Trockenstress also anhand der Photosyntheserate und der stomatären Leitfähigkeit etwas früher erkennen als in den THz-Messreihen. Andererseits ist eine Photosyntheserate oder eine stomatäre Leitfähigkeit nahe Null zwar ein deutliches Zeichen dafür, dass das beobachtete Blatt unter Trockenstress steht, aber nachdem diese Werte bei ihrem Minimum angekommen sind, erlauben sie keine differenzierte Aussage mehr darüber, wie weit der Trockenstress bereits fortgeschritten ist. Insbesondere lässt sich anhand dieser Messwerte dann nicht mehr vorhersagen, ob ein Blatt sich durch die Wiederbewässerung der Pflanze vom Trockenstress erholen wird oder nicht. Hingegen lässt sich, wie in Abschnitt 3.1.8.3 und 3.1.8.4 gezeigt, ein Zusammenhang zwischen den THz-Messungen und der Fähigkeit des Blattes zur Erholung herstellen. In diesem Zusammenhang ist auch die in Abb. 3.33 dargestellte Messreihe zu sehen. Hier erfolgte die Wiederbewässerung zu einem Zeitpunkt, zu dem anhand der hohen THz-Transmission schon erkennbar war, dass keine Erholung des Blattes mehr zu erwarten war, was der weitere Verlauf der Messungen bestätigt. Die Messwerte des Photosynthese-Messsystems hätten im Vergleich mit den anderen Messreihen diese Vorhersage nicht begründet. Dass Abb. 3.33 für die Tage nach der Wiederbewässerung keine Messwerte des Photosynthese-Messsystems mehr enthält, liegt daran, dass das für die Messungen verwendete Blatt so weit vertrocknet war, dass keine sinnvollen Messungen mehr möglich waren.

Sofern sich ein Blatt bei der Wiederbewässerung erholt, ist diese Reaktion sowohl in der THz-Messreihe als auch in den Messwerten für die Photosyntheserate und die stomatäre Leitfähigkeit unmittelbar sichtbar. Die Photosyntheserate und die stomatäre Leitfähigkeit zeigen direkt nach der Wiederbewässerung einen sehr steilen Anstieg, der aber nicht lange anhält und auf den anschließend zunächst wieder ein Abfall dieser beiden Werte folgt. Obwohl der Blattwassergehalt innerhalb weniger Stunden auf seinem normalen Niveau ankommt, kann es also offenbar mehrere Tage dauern, bis sich nach starkem Trockenstress auch die Werte für die Photosyntheserate und die stomatäre Leitfähigkeit auf ihrem ursprünglichen Niveau wieder finden. Leider konnte diese Entwicklung mit dem Photosynthese-Messsystem nicht mehr vollständig mitverfolgt werden, da dieses nicht länger für die Messungen zur Verfügung stand.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die beiden miteinander verglichenen Messverfahren den Trockenstress und die Wiederbewässerung der Pflanzen in im Prinzip übereinstimmender Weise erfassen. Ein wichtiger Unterschied, der dabei sichtbar wird, ist aber der, dass die Photosynthese-Messungen sich eher dafür eignen, beginnenden milden Trockenstress zu erkennen, während die Stärke der THz-Spektroskopie darin besteht, bei stärkerem Trockenstress zu beurteilen, wie weit die Austrocknung des Blattes schon fortgeschritten ist. Die beiden Messverfahren stehen also nicht in direkter Konkurrenz, sondern ergänzen einander.

3. THz-Messungen

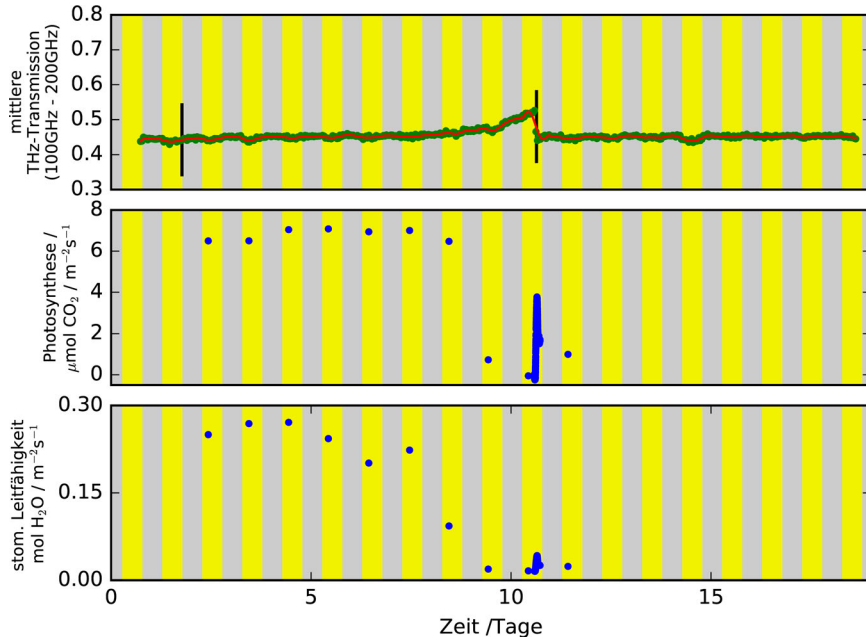


Abbildung 3.29.: Die gleichzeitige Verwendung des THz-Spektrometers und des Photosynthese-Messsystems an derselben Sojapflanze erlaubt den Vergleich der beiden Verfahren. (Messreihe 6 in Abb. 3.21)

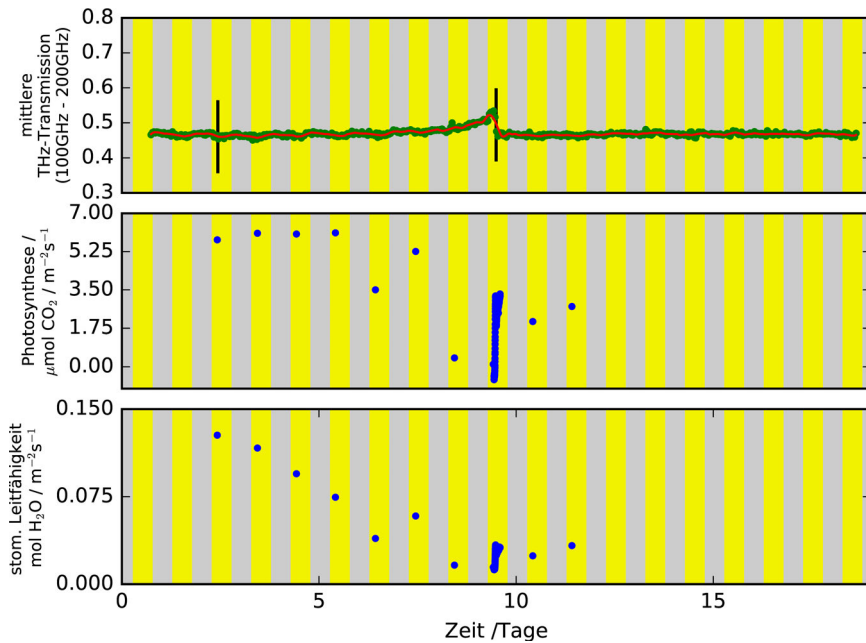


Abbildung 3.30.: Eine weitere Messreihe an einer Sojapflanze unter gleichzeitiger Verwendung des THz-Spektrometers und des Photosynthese-Messsystems. (Messreihe 8 in Abb. 3.21)

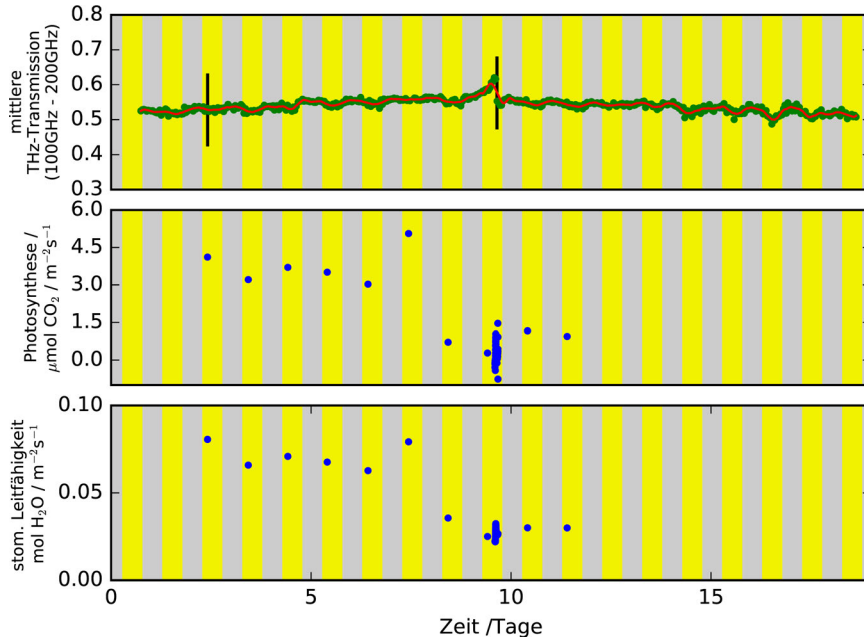


Abbildung 3.31.: Eine weitere Messreihe an einer Sojapflanze unter gleichzeitiger Verwendung des THz-Spektrometers und des Photosynthese-Messsystems. (Messreihe 10 in Abb. 3.21)

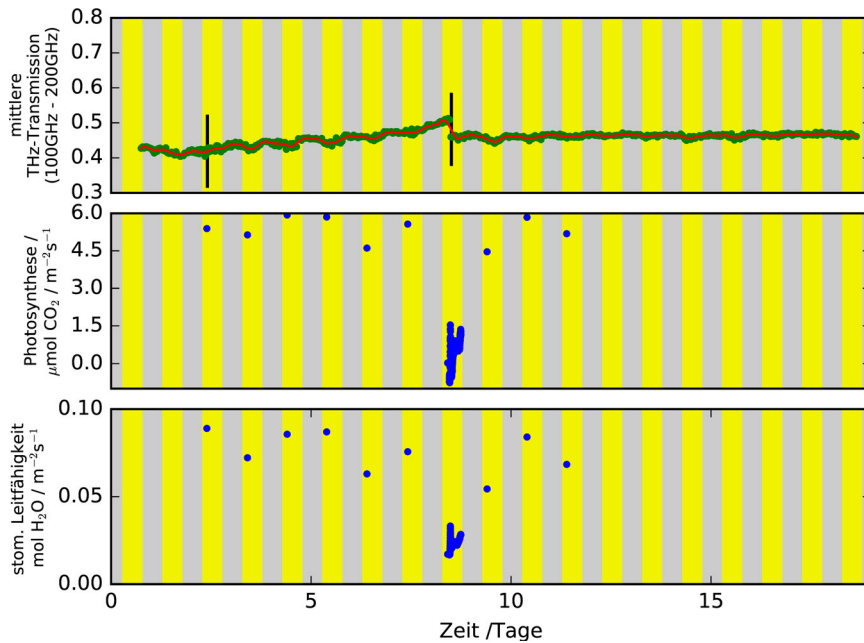


Abbildung 3.32.: Eine weitere Messreihe an einer Sojapflanze unter gleichzeitiger Verwendung des THz-Spektrometers und des Photosynthese-Messsystems. (Messreihe 13 in Abb. 3.21)

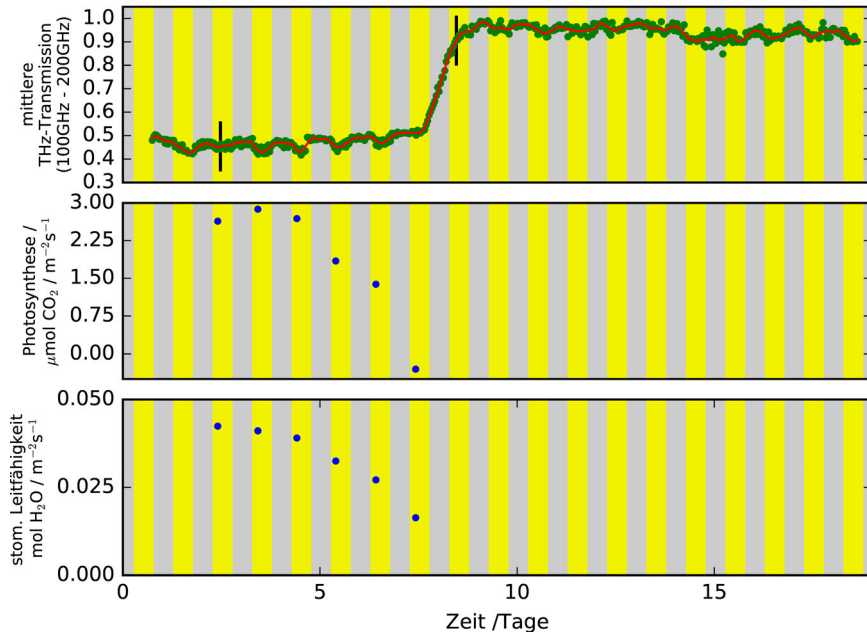


Abbildung 3.33.: Eine weitere Messreihe an einer Sojapflanze unter gleichzeitiger Verwendung des THz-Spektrometers und des Photosynthese-Messsystems. In diesem Fall erfolgt die Wiederbewässerung zu spät, um noch die Erholung des Blattes zu erlauben. (Messreihe 11 in Abb. 3.21)

3.1.9. Beschreibung als dynamisches System

Eine weitere Herangehensweise an die Interpretation der Langzeit-Messreihen besteht in der mathematischen Beschreibung des zeitlichen Verlaufs des Blattwassergehalts als dynamisches System. Der Transfer von Wasser zwischen Boden, Pflanze und Luft lässt sich durch Differenzialgleichungen ausdrücken, die den Zu- und Abfluss des Wassers in diesen drei Bereichen beschreiben. In solchen Modellen, deren dynamische Entwicklung durch Differenzialgleichungen beschrieben wird, wird meist ein Anfangszustand angenommen, von dem ausgehend die weitere Entwicklung des Systems vollständig durch diese Differenzialgleichungen bestimmt wird. Solche Gleichungen, deren Lösung keine explizite Abhängigkeit von der Anfangszeit besitzt, werden auch als autonom bezeichnet [167]. Hier kommen allerdings die Bewässerung der Pflanze und der Wechsel zwischen Tag und Nacht als von außen aufgeprägte Umgebungsbedingungen hinzu, die in die Entwicklung des Systems eingreifen.

Das im Folgenden vorgestellte Modell erhebt nicht den Anspruch in der vorliegenden Form allgemeingültig auf beliebige Pflanzen anwendbar zu sein. Zudem bietet es an einigen Stellen noch Raum zur Weiterentwicklung. Diese sollen weiter unten diskutiert werden. Im Folgenden wird zunächst das Modell in seiner derzeitigen Form vorgestellt und seine prinzipielle Tauglichkeit anhand einer Messreihe mit einer Haferpflanze gezeigt.

Der Wassergehalt der Erde im Pflanztopf und der Wassergehalt des Blattes werden durch die folgenden beiden Differenzialgleichungen beschrieben und zueinander in Beziehung gesetzt:

$$\frac{dW_{Boden}}{dt} = -W_{Boden} (D_{Boden,Luft} + D_{Boden,Tag} l(t)) - c_{Blatt,Boden} B_{Aufnahme} \quad (3.4)$$

$$\frac{dW_{Blatt}}{dt} = B_{Aufnahme} - B_{Abgabe} \quad (3.5)$$

Dabei werden zusätzlich die folgenden Hilfsleichungen verwendet:

$$B_{Abgabe} = (W_{Blatt} - W_{Blatt,min}) \cdot (l(t) D_{Blatt,Tag} + (1 - l(t)) D_{Blatt,Nacht}) \quad (3.6)$$

$$B_{Aufnahme} = (1 - e^{-s \cdot W_{Boden}}) \left(B_{Abgabe} + v_{Blatt} \frac{W_{Blatt,normal} - W_{Blatt}}{W_{Blatt,normal}} \right) \quad (3.7)$$

$$l(t) = \begin{cases} 1 & \text{Tag} \\ 0 & \text{Nacht} \end{cases} \quad (3.8)$$

In Gleichung (3.4) wird das Austrocknen der Erde im Abhängigkeit von deren momentanem Wassergehalt W_{Boden} beschrieben, wobei das Austrocknen einerseits tageszeitunabhängig durch den Kontakt zwischen Erde und Luft zustande kommt und tagsüber zusätzlich durch die Wärmeeinstrahlung der Pflanzenlampe beschleunigt wird. Hinzu kommt der Teil des Wassers, der von der Pflanze aufgenommen wird. Dabei trägt der Faktor $c_{Blatt,Boden}$ der Tatsache Rechnung, dass die Pflanze und die Erde verschiedene Kapazitäten zur Speicherung von Wasser besitzen. Gleichung (3.5) beschreibt den Wassergehalt des Blattes W_{Blatt} als die Bilanz aus Wasseraufnahme und -abgabe. Definiert werden diese beiden Größen in den Gleichungen (3.6)

und (3.7). Die Wasserabgabe des Blattes an die Luft erfolgt in Gleichung (3.6) in Abhängigkeit vom im Blatt vorhandenen Wassergehalt unter Berücksichtigung eines minimalen Wassergehalts, den das Blatt versucht immer aufrecht zu erhalten. Die Geschwindigkeit der Wasserabgabe ist wie auch das Austrocknen der Erde von Tag und Nacht abhängig, was durch die beiden Konstanten $D_{Blatt,Tag}$ und $D_{Blatt,Nacht}$ zum Ausdruck gebracht wird.

Die Geschwindigkeit der Wasseraufnahme setzt sich zusammen aus der Wasserabgabe, die idealerweise vollständig ausgeglichen werden sollte, und dem Bestreben des Blattes, bei unterschreiten seines Soll-Wassergehalts diesen wieder aufzufüllen, das durch den Term $\frac{W_{Blatt,normal} - W_{Blatt}}{W_{Blatt,normal}}$ zum Ausdruck kommt. Die maximale Geschwindigkeit dieses Wiederauffüllens wird bestimmt durch die Konstante v_{Blatt} . Die Wasseraufnahme kann allerdings nur dann in vollem Umfang stattfinden, wenn im Boden in ausreichendem Umfang Wasser vorhanden ist. Durch den Term $(1 - e^{-s \cdot W_{Boden}})$ wird in Gleichung (3.7) eine nach und nach einsetzende Schwelle eingefügt, die der erschwerten Wasseraufnahme bei einem geringeren Wassergehalt des Bodens Rechnung trägt. Die Lage dieser Schwelle wird durch die Konstante s festgelegt.

In der praktischen Umsetzung kann dieses Modell in einem Computerprogramm implementiert werden, welches numerisch eine Lösung der Gleichungen approximiert. Wie oben angesprochen, kann dabei nicht alleine von einem einmal festgelegten Ausgangszustand ausgehend der weitere Verlauf des Wassergehalts des Bodens und des Blattes berechnet werden, sondern es müssen ebenfalls zeitabhängige äußere Umgebungsbedingungen berücksichtigt werden. Die Abhängigkeit von Tag und Nacht ist durch die Fallunterscheidung in $l(t)$ in die Gleichungen integriert. Die Bewässerung der Pflanze stellt hingegen eine abrupte Zustandsänderung dar, welche zu diskreten, von außen gegebenen Zeitpunkten der Entwicklung aufgeprägt wird. Dies lässt sich so implementieren, dass das numerische Lösen der Gleichungen abschnittsweise von Bewässerungszeitpunkt zu Bewässerungszeitpunkt erfolgt. Immer, wenn der nächste Bewässerungszeitpunkt erreicht wird, stoppt die Berechnung und der Wert von W_{Boden} wird gegen einen neuen, durch die Bewässerung vorgegebenen Wert, ausgetauscht. Alle anderen Größen bleiben dabei unverändert und die Berechnung wird bis zum nächsten Bewässerungszeitpunkt fortgesetzt. Diese abrupte Änderung von W_{Boden} ist deshalb machbar, weil die weitere Entwicklung der durch die Gleichungen beschriebenen Größen nur von deren momentanem Wert und nicht etwa von deren Ableitung abhängt. Um das Modell mit den Daten einer Langzeitmessreihe mit dem THz-Zeitbereichsspektrometer zur Deckung zu bringen, muss für W_{Boden} ein Zusammenhang zum aufgezeichneten Gewicht des Topfes hergestellt werden und W_{Blatt} muss zur durch das Blatt gemessenen THz-Transmission in Bezug gesetzt werden. Im Fall von W_{Boden} geschieht dies durch einen Offset und einen Proportionalitätsfaktor. Für den Zusammenhang zwischen W_{Blatt} und der Transmission t_{Blatt} wird in Anlehnung an das Lambert-Beersche Absorptionsgesetz eine Umrechnung der Form $t_{Blatt} = e^{-W_{Blatt} \cdot c_1 + c_2}$ verwendet. Die Konstanten c_1 und c_2 stehen dabei für den Absorptionskoeffizienten des Wassers, der sich hier aber nicht auf die Dicke der Wasserschicht sondern auf den vom Modell bestimmten Wassergehalt bezieht, und für die Absorption durch andere Bestandteile des Blattes. Unter Zuhilfenahme dieser Zusammenhänge kann durch numerische Optimierung ein Parametersatz gesucht werden, der das Modell mit den Messdaten zur Deckung bringt. Abb. 3.34 stellt das Ergebnis eines solchen Anpassungsprozesses an die Daten der ersten Pflanze aus der

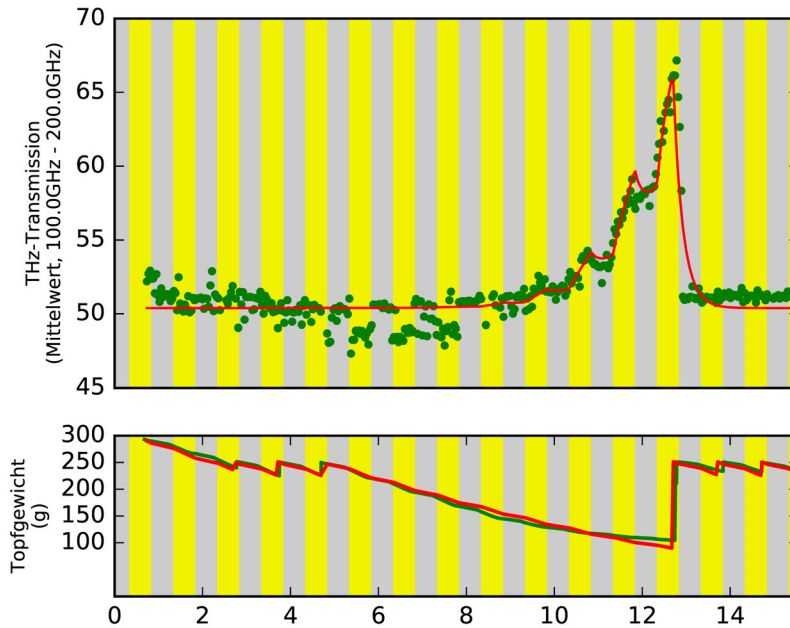


Abbildung 3.34.: Das Trockenstressverhalten einer Haferpflanze wurde als dynamisches System modelliert, welches die Austrocknung und Wiederbewässerung der Pflanze mathematisch beschreibt. In die Simulation wird auch der Wassergehalt der Erde, bzw. das Gewicht des Topfes mit der Pflanze, mit einbezogen. Die rote Kurve zeigt das Ergebnis des durch numerische Optimierung an die Messdaten angepassten Modells.

ersten Hafer-Messreihe (vgl. Abb. 3.12) dar. Die Implementierung erfolgte in der Programmiersprache Python 3.4.4, wobei aus dem Paket Scipy (Version 0.17.0) die Funktionen „`integrate.odeint`“ und „`optimize.minimize`“ zum Einsatz kommen, um die Differenzialgleichungen numerisch zu lösen, bzw. um die Differenz zwischen dem Ergebnis dieser Lösung und den Messdaten zu minimieren.

Abb. 3.34 zeigt, dass das Modell in der Lage ist, den zeitlichen Verlauf der Messdaten in sinnvoller Weise anzunähern. Der Vergleich zwischen der gemessenen und der simulierten Kurve zeigt, dass die Simulation eine gute Annäherung an die Messung darstellt. So bleibt auch in der Simulation der Wassergehalt des Blattes bei regelmäßiger, ausreichender Bewässerung konstant. Bei ausbleibender Bewässerung sinkt der Wassergehalt der Erde im Topf und der Wassergehalt des Blattes beginnt ebenfalls zu sinken, sobald der Wassergehalt der Erde zu tief gesunken ist, um die Pflanze noch ausreichend mit Wasser zu versorgen. Die dadurch ausgelöste Zunahme der transmittierten THz-Amplitude verläuft auch in der Simulation nicht monoton, sondern bildet ab, wie die Pflanze in der Nacht trotz Trockenstress in geringem Umfang wieder Wasser aufnehmen kann. Schließlich findet sich auch die schnelle Wiederaufnahme des Wassers nach der Wiederbewässerung in der Simulation wieder. Man kann also festhalten, dass die in dem Modell angenommenen Zusammenhänge in der Lage sind, den beobachteten Kurvenverlauf zu erklären.

Das Modell bietet allerdings, wie oben angesprochen, noch Raum zur Weiterentwicklung. Auch wenn die durch die Gleichungen formulierten Zusammenhänge

sich auf physikalische und pflanzenphysiologische Begründungen zurückführen lassen, besitzen die Konstanten, welche in das Modell eingesetzt werden, um es mit den Messdaten zur Deckung zu bringen, nicht notwendigerweise sinnvolle physikalische Einheiten. In dieser Hinsicht wäre es also wünschenswert, das Modell dahingehend zu modifizieren, dass die bei der numerischen Anpassung des Modells an die Messdaten bestimmten Zahlenwerte eine direkte anschauliche Bedeutung bezüglich des Trockenstressverhaltens der Pflanze erhalten. Ein pflanzenphysiologischer Zusammenhang, der im Modell noch nicht berücksichtigt ist, ist der permanente Welkepunkt der Pflanze. In der derzeitigen Form des Modells wird die simulierte Pflanze nach der Wiederbewässerung in jedem Fall wieder Wasser aufnehmen, unabhängig davon wie weit sie zuvor vertrocknet war. Dies könnte geändert werden, indem in das Modell ein Schwellenwert eingeführt wird, der darüber entscheidet, ob die Pflanze noch Wasser aufnehmen kann oder nicht. Die oben beschriebene Umrechnung der durch das Modell bestimmten Werte für den Wassergehalt des Blattes und der Erde in Werte, die mit der THz-Transmission und dem Topfgewicht vergleichbar sind, wurde hier bewusst einfach gehalten. In einer Weiterentwicklung des Modells könnte aber für den Zusammenhang zwischen Blattwassergehalt und Transmission auch die in Abschnitt 3.2 beschriebene Modellierung des Blattes als effektives Medium Verwendung finden. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Stärke des Modells in seiner gegenwärtigen Form darin besteht, trotz aller Vereinfachungen alle wesentlichen Merkmale der Messung abzubilden.

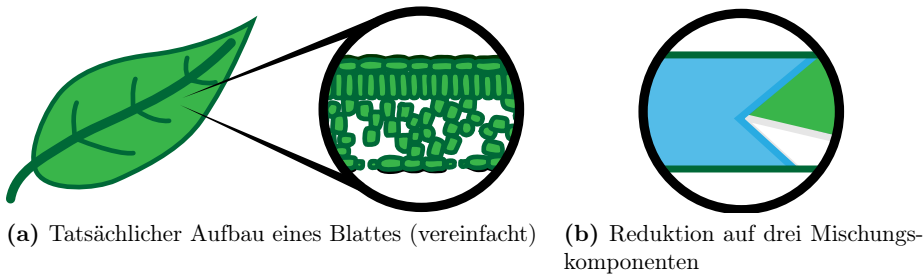


Abbildung 3.35.: In einer vereinfachten, aber dennoch realistischen Darstellung setzt sich ein Blatt einer Pflanze wie in (a) dargestellt aus Zellen zusammen, die wiederum aus Wasser und Trockenmasse bestehen. Zwischen den Zellen befinden sich zudem Luft einschüsse im Blatt. Für die Beschreibung des Blattes als effektives Medium wird die innere Geometrie des Blattes vernachlässigt. Dies wird in (b) durch die Darstellung der Volumenanteile von Wasser, Trockenmasse und Luft als Tortendiagramm angedeutet.

3.2. Modellierung des Blattes als effektives Medium

Das unter 3.3 beschriebene Auswertungsverfahren zur Bestimmung des relativen Wassergehalts eines Blattes basiert auf dem Vergleich von zwei Messungen an demselben Blatt zu verschiedenen Zeitpunkten. Dabei wird dort nur das im Blatt enthaltene Wasser in Betracht gezogen, während alle anderen Bestandteile des Blattes ignoriert werden. Diese Vorgehensweise hat sich wie unter 3.1.8 gezeigt, als nützlich erwiesen. Wenn allerdings an Stelle des relativen Wassergehalts ein absoluter Wert für den Wassergehalt des Blattes als Gewichts- oder Volumenanteil gefragt ist, dann ist es notwendig, neben dem Wasser auch die festen Bestandteile des Blattes und die darin eingeschlossene Luft in der Auswertung der Messungen zu berücksichtigen. Für eine derartige Auswertung bietet es sich an, das Blatt in einem Modell als ein effektives Medium zu beschreiben, das sich aus den drei Bestandteilen Wasser, Trockenmasse und Luft zusammensetzt. Ein solches Modell findet sich bei Jördens et al. [16]. Von Gente et al. [18] wurde die Nutzung dieses Modells zur Bestimmung des Wassergehalts demonstriert.

Im Folgenden wird zunächst das Modell in der hier verwendeten Form vorgestellt. Darauf folgt die Beschreibung des Spektrometers, mit dem die Messungen zur Evaluation des Modells und der Auswertungsmethode durchgeführt wurden. Schließlich wird die anhand einer Messreihe an Blättern von Gerstenpflanzen die Funktion dieser Methode demonstriert.

3.2.1. Modellierung

Es existieren verschiedene theoretische Ansätze, die zur Beschreibung einer Mischung aus verschiedenen Materialien als effektives Medium genutzt werden können. Oft gehen diese von geometrischen Annahmen über die Mischung der verschiedenen Materialien aus, wie z.B., dass kugel- oder stäbchenförmige Partikel aus einem Material in einem anderen Material eingeschlossen sind. Da derartige Annahmen nicht der in einem Blatt einer Pflanze anzutreffenden Realität entsprechen, bietet sich hier die Theorie von Landau, Lifshitz und Looyenga an, die keine Annahmen über die Geo-

metrie der gemischten Materialien macht. Diese Vereinfachung wird in Abb. (3.35) dargestellt. Von Jördens et al. [16] wurde die Tauglichkeit dieser Theorie zur Modellierung eines Blattes einer Pflanze demonstriert. Sofern die dielektrischen Eigenschaften der Mischungskomponenten und deren Volumenanteile bekannt sind, können so die Eigenschaften des resultierenden effektiven Mediums berechnet werden. Im Fall eines Blattes einer Pflanze stellt sich dieser Zusammenhang für die Berechnung der Permittivität der Mischung folgendermaßen dar:

$$\sqrt[3]{\epsilon_L(f)} = a_W \sqrt[3]{\epsilon_W(f)} + a_S \sqrt[3]{\epsilon_S(f)} + a_A \sqrt[3]{\epsilon_A(f)}, \quad a_W + a_S + a_A = 1 \quad (3.9)$$

Die Indizes wurden so gewählt, dass diese konsistent mit der englischsprachigen Literatur sind und stehen für das Blatt (leaf), Wasser, Trockenmasse (solid material) und Luft (air). Im Allgemeinen besteht zwischen den Permittivitäten der drei Mischungskomponenten $\epsilon_W(f)$, $\epsilon_S(f)$ und $\epsilon_A(f)$ keine lineare Abhängigkeit. Daraus folgt, dass, sofern sowohl diese drei Permittivitäten als auch die Permittivität des durch die Mischung beschriebenen Blattes für mehrere Frequenzen bekannt sind, prinzipiell die Möglichkeit besteht, daraus die Volumenteile a_W , a_S und a_A zu bestimmen. Während für ϵ_W und ϵ_A Literaturwerte verwendet werden können und ϵ_S aus einer separaten Messung an getrocknetem Blattmaterial bestimmt werden kann, ist die direkte Bestimmung der Permittivität des Blattes ϵ_L in der Praxis problematisch. Die unter 2.3.4 beschriebene Methode, die verwendet werden kann, um aus einer Messung mit einem THz-Zeitbereichsspektrometer gleichzeitig die Dicke und die Permittivität bzw. den komplexen Brechungsindex einer Probe zu bestimmen, ist hier in dieser Form nicht anwendbar. Dieses Verfahren basiert auf der Auswertung der mehrfach in der Probe hin und her laufenden Reflexionen. Dabei wird von einer glatten Oberfläche der Probe ausgegangen, was hier aufgrund der rauen Oberflächenstruktur des Blattes nicht gegeben ist. Aus diesem Grund wird hier zur Bestimmung der Volumenanteile ein anderer Ansatz verfolgt, der ohne die explizite Bestimmung von ϵ_L auskommt. Dieser Ansatz basiert darauf, das Modell, welches das Blatt als effektives Medium beschreibt, so zu erweitern, dass es die Berechnung der Übertragungsfunktion des Blattes erlaubt, welche die Transmission der THz-Strahlung durch das Blatt beschreibt:

$$H_L(f) = \frac{4n_L}{(n_L + 1)^2} e^{-\alpha_L d/2} e^{i2\pi f d(\Re(n_L) - 1)/c}, \quad n_L = \sqrt{\epsilon_L}, \quad \alpha_L = 4\pi f \Im(n_L) / c \quad (3.10)$$

Diese Darstellung entspricht Gleichung (2.6) mit dem Unterschied, dass hier keine Reflexionen des THz-Pulses innerhalb des Blattes berücksichtigt werden. Stattdessen ist es wichtig, die Streuung der THz-Strahlung an den Oberflächen des Blattes zu berücksichtigen, die eine zusätzliche Abschwächung des Signals bewirkt. Jördens et al. [16] führen dazu basierend auf der Rayleigh'schen Streutheorie einen Ausdruck ein, der die Streuung in Form eines effektiven Absorptionskoeffizienten beschreibt. Dieser setzt sich zusammen als

$$\alpha_{L,eff} = \alpha_L + \left((n_L - 1) \frac{4\pi\tau}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{d} \quad (3.11)$$

Dabei sind τ die Standardabweichung des Höhenprofils der Blattoberfläche, λ die Wellenlänge und d die Blattdicke. In ihrer ursprünglichen Form beschreibt die Rayleigh'sche Streutheorie die Streuung in dem Fall, dass eine elektromagnetische Welle

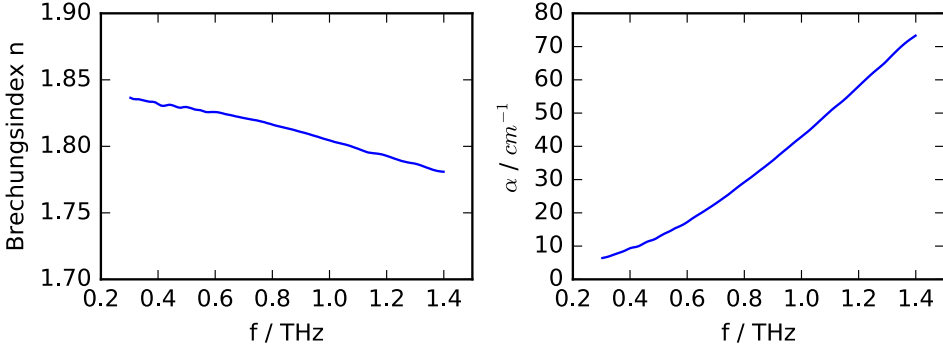


Abbildung 3.36.: Dielektrische Eigenschaften der festen Bestandteile von Gerstenblättern. Hier dargestellt in Form des reellen Brechungsindex und des Absorptionskoeffizienten.

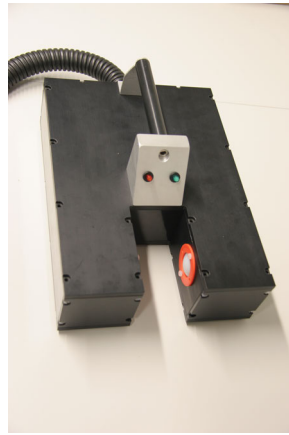
an einer rauen Oberfläche reflektiert wird. Als Grundlage der Streuung wird dabei die Variation der Phase innerhalb der reflektierten Wellenfront betrachtet, die durch die lokalen Weglängenunterschiede aufgrund der Rauigkeit der Oberfläche entsteht [168]. Hier wird allerdings an Stelle der reflektierten Welle der durch das Blatt transmittierte Anteil betrachtet. Bei der Betrachtung der Weglängenunterschiede innerhalb der transmittierten Wellenfront muss deshalb die Differenz zwischen dem Brechungsindex des Blattes und der umgebenden Luft berücksichtigt werden. Eine genauere Diskussion dieser Modifikation der Rayleigh'schen Streutheorie findet sich auch bei Pinel et al. [169].

Die für die Anwendung dieses Modells benötigte komplexe Permittivität von Wasser im THz-Frequenzbereich findet sich bei Liebe et al. [3] in Form eines erweiterten Debye-Modells. Für die Permittivität der Luft wird ein reeller Wert von 1 angenommen. Die Permittivität der Trockenmasse des Blattes wurde in einer separaten Messung bestimmt. Zu diesem Zweck wurden einige Blätter vollständig getrocknet, in einem Mörser zerkleinert und zu einer Tablette gepresst. Diese Tablette wurde anschließend in einem THz-Zeitbereichsspektrometer untersucht und die so erhaltenen Daten wurden, wie unter 2.3.4 beschrieben, ausgewertet. Die so erhaltenen Eigenschaften der festen Bestandteile der Blätter sind in Abb. (3.36) dargestellt.

Sofern man die Zusammensetzung und die Dicke eines Blattes bereits kennt, lässt sich mit Gleichung (3.10) nun also dessen Übertragungsfunktion auf theoretische Weise errechnen. Der in der praktischen Anwendung interessantere Fall besteht allerdings darin, dass die Zusammensetzung und die Dicke des Blattes unbekannt sind und die Übertragungsfunktion experimentell bestimmt wird, indem eine Messung mit einem THz-Spektrometer an einem Blatt durchgeführt und entsprechend Gleichung (2.4) ausgewertet wird. Aus dieser Übertragungsfunktion lassen sich die Volumenanteile der Mischungskomponenten und die Dicke des Blattes bestimmen, indem diese Parameter so angepasst werden, dass die experimentell bestimmte und die theoretische Übertragungsfunktion zur Deckung gebracht werden. Ausgehend von Startwerten, die im Prinzip willkürlich gewählt werden können, aber in der Größenordnung des erwarteten Ergebnisses liegen sollten, werden die Parameter so variiert, dass die Abweichung zwischen der experimentellen und der theoretischen Übertragungsfunktion minimiert wird. Für die Auswertung der im Folgenden be-



(a) Mobiles THz-System im 19“-Rack



(b) Mit dem THz-System verbundener Messkopf

Abbildung 3.37.: Hinter den Frontblenden des in (a) dargestellten 19“-Racks verbergen sich (von unten nach oben) der Lasercontroller, der Laser, der Faserstrecker als Verzögerungsstrecke und eine USB-Datenerfassungskarte. In dem in (b) gezeigten Messkopf befinden sich zwei fasergekoppelte THz-Antennenmodule. Nicht im Bild: Die Positionierung der Blätter im THz-Strahlengang kann durch einen an den Messkopf montierten Abstandshalter erleichtert werden.

schriebenen Messreihe wurde für diesen Anpassungsprozess das Modell entsprechend den Gleichungen (3.10) und (3.11) in einem Matlab-Programm implementiert. Für die Anpassung der Modellparameter an die Messdaten kommt die in Matlab enthaltene „Optimization Toolbox“ zum Einsatz.

An Stelle des Volumenanteils a_W des Wassers im Blatt, der letztendlich das Ergebnis dieser Auswertung ist, ist es in der Regel zweckmäßiger, den Gewichtsanteil anzugeben. Unter Einbeziehung der Dichte der Mischungskomponenten lässt sich der Volumenanteil in den Gewichtsanteil umrechnen, der dem in Gleichung (2.1) definierten gravimetrischen Wassergehalt entspricht:

$$W_{\%,THz} = \frac{a_W \rho_W}{a_W \rho_W + a_S \rho_S + a_A \rho_A} \approx \frac{a_W \rho_W}{a_W \rho_W + a_S \rho_S} \quad (3.12)$$

3.2.2. Versuchsaufbau: Mobiles TDS-System

Das hier verwendete THz-Zeitbereichsspektrometer wurde als mobiles Messsystem aufgebaut, das für Messungen an Pflanzen beispielsweise in einem Gewächshaus verwendet werden kann. Zu diesem Zweck wurden alle größeren Komponenten, die zum Betrieb des Spektrometers notwendig sind, in ein auf Rollen stehendes 19“-Rack-Gehäuse eingebaut. Zu diesen Komponenten zählen ein Faserlaser (Menlo Systems T-Light), der dazugehörige Lasercontroller, ein Faserstrecker (TEM Messtechnik) als Verzögerungsstrecke und eine USB-Datenerfassungskarte (National Instruments NI USB 6210). In einem als separates Gehäuse realisierten Messkopf sind die fasergekoppelten THz-Antennenmodule zusammen mit HDPE-Polymerlinsen zur Strahlführung untergebracht. Zudem befindet sich dort auch ein Transimpedanzverstärker zur Erfassung des in der Detektor-Antenne induzierten Photostroms. Die Glasfasern und Kabel, welche den Messkopf mit den anderen Komponenten des Messsystems

verbinden, sind in einem Schlauch zusammengefasst. Der Faserlaser emittiert bei einer Wellenlänge von 1550 nm kurze Lichtpulse mit einer zeitlichen Halbwertsbreite von ca. 65 fs mit einer Repetitionsrate von 80 MHz. Die durch diese Lichtpulse in der Emitter-Antenne erzeugten THz-Pulse werden unter Zuhilfenahme des Faserstreckers abgerastert, der mit der periodischen Streckung und Entspannung einer um zwei zylinderförmige Piezoelemente gewickelten Glasfaser bei einer Frequenz von ca. 10 Hz ein Zeitfenster von ca. 15 ps Länge durchfährt. Ein in den Faserstreckter integriertes bei einer separaten Wellenlänge arbeitendes Mach-Zehnder-Interferometer erzeugt ein Trigger-Signal für die Erfassung der Messwerte durch die Datenerfassungskarte. Diese ist an einen Laptop angeschlossen, der die Speicherung der Messdaten übernimmt. Durch die Polymerlinsen im Messkopf wird ein Zwischenfokus im THz-Strahlengang hergestellt, in den die zu untersuchenden Blätter für die Messungen eingebracht werden können.

3.2.3. Messungen und Ergebnisse

Für die Messungen wurden Blätter von Gerstenpflanzen verwendet, welche zuvor bei guter Bewässerung herangewachsen waren [18]. Von den Pflanzen wurden zehn Blätter abgeschnitten. Anschließend wurde sofort mit den Messungen begonnen. Die Blätter wurden einzeln gewogen. Anschließend wurde mit jedem Blatt eine Messung im THz-Zeitbereichsspektrometer durchgeführt. Vor der Wiederholung des Wiegens und der THz-Messungen wurden die Blätter für 10 Minuten bei 60°C in einem Ofen getrocknet. Diese Schritte wurden insgesamt zwölf Mal wiederholt, so dass die Austrocknung der Blätter Schritt für Schritt betrachtet werden kann. Dabei wurden die THz-Messungen im Rahmen der Genauigkeit der manuellen Platzierung im THz-Strahlengang an einer gleichbleibenden Position auf den Blättern ausgeführt, um Schwankungen der Messwerte aufgrund eventueller Inhomogenitäten innerhalb der Blätter zu vermeiden. Schließlich wurden die Blätter im Ofen vollständig ausgetrocknet, so dass das Gewicht der Trockenmasse bestimmt werden konnte. Entsprechend Gleichung (2.1) kann der Wassergehalt der Blätter für jeden Austrocknungs-Schritt berechnet werden:

$$W_{\%}^{(i)} = \frac{m_i - m_{trocken}}{m_i}$$

Dabei ist m_i die Masse des Blattes bei der i -ten Messung und $m_{trocken}$ die am Ende des Experiments bestimmte Masse des komplett getrockneten Blattes. Diese Werte werden zum Vergleich mit dem Ergebnis der Auswertung der THz-Messungen herangezogen. Für die THz-Messungen alleine wäre es nicht notwendig, die Blätter von den Pflanzen abzuschneiden. Das eigentliche Messverfahren ist also nicht-invasiv. Die THz-Messungen wurden auf die oben beschriebene Weise im Frequenzfenster von 150 GHz bis 950 GHz ausgewertet, wobei a_W , a_S , a_W und d als freie Fit-Parameter bestimmt wurden. Für die Rauigkeit der Blattoberfläche wurde ein fester Wert von $\tau = 1 \mu\text{m}$ angenommen.

Der Vergleich der beiden Methoden in Abb. (3.38) zeigt, dass die Austrocknung der Blätter durch die THz-Messungen in realistischer Weise wiedergegeben wird. Gleichzeitig ist auch sichtbar, dass die THz-Messungen einer größeren Streuung unterliegen als die gravimetrischen Messungen. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass die Genauigkeit der gravimetrischen Methode im Wesentlichen durch die

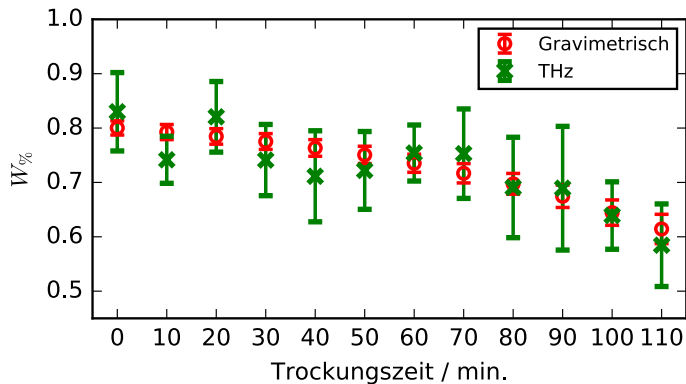


Abbildung 3.38.: Der Wassergehalt der schrittweise ausgetrockneten Blätter wurde sowohl gravimetrisch als auch durch Anwendung des Modells auf die THz-Messdaten bestimmt. Hier dargestellt ist jeweils der Mittelwert über die zehn untersuchten Blätter. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler des Mittelwerts an. Innerhalb der Messgenauigkeit zeigt sich eine gute Übereinstimmung der beiden Methoden.

Genauigkeit der verwendeten Waage bestimmt wird, was im Allgemeinen sehr genaue Messungen ermöglicht. Es ist nicht überraschend, dass diese Genauigkeit durch die THz-Messungen nicht erreicht wird. Andererseits muss man auch berücksichtigen, dass bei der THz-Messung ein kreisförmiger Ausschnitt des Blattes mit einem Durchmesser von ca. 3 mm betrachtet wird, während die gravimetrische Messung einen Mittelwert über das ganze Blatt darstellt. Abweichungen zwischen beiden Methoden können also auch durch tatsächlich vorhandene Unterschiede zwischen dem mittleren Wassergehalt des ganzen Blattes und dem lokalen Wassergehalt an der Stelle der THz-Messung entstehen. Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass es notwendig ist, die Messungen nicht an einem einzelnen, sondern an einer größeren Anzahl von Blättern durchzuführen. In diesem Fall zeigt sich im Mittelwert eine gute Übereinstimmung der beiden Methoden. Aufgrund der sichtbar geringeren Streuung der Messwerte der gravimetrischen Methode scheint diese evtl. auf den ersten Blick eine technisch wesentlich einfachere und zudem genauere Alternative zu sein. Jedoch muss in diesem Kontext berücksichtigt werden, dass die gravimetrischen Messungen überhaupt nur dann durchgeführt werden können, wenn es akzeptabel ist, Teile von der Pflanze abzuschneiden. Die Stärke der THz-Messungen besteht also darin, auch dann Messwerte zu liefern, wenn ausschließlich nicht-invasive Messungen durchgeführt werden können.

3.3. THz-Quasi-Zeitbereichs-Messungen

Die unter 2.4 beschriebene QTDS-Technik erlaubt den Aufbau eines THz-Spektrometers auf verhältnismäßig preisgünstige Weise. In der technischen Umsetzung kann ein solches THz-Quasi-Zeitbereichsspektrometer identisch zu einem THz-Zeitbereichsspektrometer aufgebaut werden, wobei der einzige Unterschied darin besteht, dass an Stelle eines modengekoppelten Kurzpulslasers eine einfache Multimode-Laserdiode verwendet wird. Sowohl die Strahlführung als auch die für den Betrieb des Spektrometers nötigen Peripheriegeräte können in identischer Weise beibehalten werden. Dieser Ansatz wird im Folgenden in Abschnitt 3.3.1 verfolgt. In Abschnitt 3.3.3 werden anschließend Möglichkeiten demonstriert, wie auch die Peripherie des Spektrometers wesentlich preisgünstiger und kompakter aufgebaut werden kann.

3.3.1. Labor-Aufbau

Das hier verwendete THz-Quasi-Zeitbereichsspektrometer ist in Freistrah-Technik aufgebaut und entspricht dem in Abb. 2.1a dargestellten Schema. Als Laser kommt eine Multimode-Laserdiode zum Einsatz, welche bei einer Wellenlänge von 660 nm emittiert. Die Metallisierung der Photoleitenden Antennen ist in Form einer Dipolstruktur mit einer Länge von 200 μm ausgeführt. Als Verzögerungsstrecke im optischen Weg zur Detektorantenne kommt eine mechanische Verfahreinheit (PI M 403.4PD) zum Einsatz. Auf dieser sind rechtwinklig zueinander angeordnet zwei Spiegel angebracht, so dass der einfallende Strahl parallelversetzt wieder zurückgeworfen wird. Zur Messung des in der Detektor-Antenne induzierten Stroms wird ein Lock-In-Verstärker verwendet (Signal Recovery 7265). An diesen ist unter Verwendung des in das Gerät integrierten Transimpedanzverstärkers die Detektor-Antenne direkt angeschlossen. Zur Erzeugung des Signals, welches die an die Emitter-Antenne angelegte Vorspannung moduliert, wird der in den Lock-In-Verstärker integrierte Frequenzgenerator verwendet. Das von diesem ausgegebene sinusförmige Signal mit einer Frequenz von ca 6,5 kHz wird zu diesem Zweck durch einen separaten Spannungsverstärker auf eine Amplitude von $\pm 20\text{ V}$ verstärkt. Der THz-Strahlengang wird durch Linsen aus HPDE geformt. Zwei Linsen mit einer Brennweite von jeweils 50 mm dienen dazu, die von der Emitter-Antenne kommende Strahlung zu kollimieren und anschließend auf die Detektor-Antenne zu fokussieren. In den kollimierten Strahl zwischen diesen beiden Linsen werden zwei weitere Linsen mit einer Brennweite von 30 mm eingebracht, um einen Zwischenfokus zu bilden. In diesen kann für die Messungen eine Probe eingebracht werden.

Die Steuerung des Versuchsablaufs und die Aufzeichnung der Messdaten wurden in ähnlicher Weise wie bei dem unter 3.1.1 beschriebenen THz-Zeitbereichsspektrometer auch hier in der Programmiersprache Python 3 implementiert. Da es sich bei dem Spektrometer um einen Freistrahlaufbau handelt, findet sich auch der THz-Strahlengang an einer festen Position und kann im Gegensatz zu einem fasergekoppelten Aufbau nicht frei durch den Raum bewegt werden. Um zwischen der Messung mit einer Probe im THz-Strahlengang und einer Referenzmessung ohne Probe abwechseln zu können, muss also stattdessen die Probe bewegt werden. Zu diesem Zweck wird die mit dem Spektrometer untersuchte Pflanze auf einer mechanischen Verfahreinheit platziert. Auf der Verfahreinheit ist außerdem ein Probenhalter angebracht, welcher

das für die Messung verwendete Blatt auf Höhe des THz-Strahlengangs hält. So kann das Blatt in den THz-Strahlengang hinein- und wieder herausbewegt werden, indem die komplette Pflanze vor- und zurückgefahren wird. Der Versuchsaufbau ist neben dem Tisch aufgestellt, der für die Anzucht der Pflanzen genutzt wird, so dass das Licht der darüber aufgehängten Natrium-Hochdruckdampflampe auch die Pflanze im Versuchsaufbau erreicht.

In diesem Versuchsaufbau enthält der Probenhalter, in dem das Blatt befestigt ist, im Gegensatz zu dem Aufbau in Abschnitt 3.1 keine Lochblende. Der Anteil der durch das Blatt transmittierten THz-Strahlung kann hier also durch die Anwendung von Gleichung 2.5 direkt bestimmt werden.

3.3.2. Labor-Messungen

Mit dem oben beschriebenen Versuchsaufbau wurden mehrere Messreihen durchgeführt, in denen untersucht wurde, wie die Austrocknung eines Blattes an einer unter Trockenstress stehenden Pflanze verläuft. Die Pflanzen wurden dabei ab Versuchsbeginn nicht mehr bewässert und die Messungen endeten erst, nachdem die Pflanze und das untersuchte Blatt vollständig ausgetrocknet waren. Insgesamt wurden Messreihen an sechs Roggenpflanzen, zwei Sojapflanzen und einer Maispflanze durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messreihen sind in den Abbildungen 3.39, 3.40 und 3.41 dargestellt. So wie in den Abbildungen in Abschnitt 3.1.7 wird auch hier der Wechsel zwischen Tag und Nacht durch die Hintergrundfarbe der Grafiken dargestellt. Außerdem wurden auch hier die Messreihen mit Offset-Werten versehen, um ein Überlappen der Plots zu vermeiden. Bei den in den Grafiken in grün dargestellten Messwerten handelt es sich direkt um die bei den Messungen aufgenommenen Werte. Eine Entfernung von Ausreißer-Messwerten fand nicht statt. Die in rot dargestellten geglätteten Kurven wurden unter Anwendung des in Abschnitt 3.1.6 dargestellten modifizierten Hampel- und Savitzky-Golay-Filters erstellt. Da im Versuchsaufbau immer nur eine Pflanze Platz findet, wurden die Messreihen nicht gleichzeitig, sondern nacheinander aufgenommen. Bei den Messreihen mit den Roggenpflanzen zeigten sich deutliche Unterschiede in der Zeitdauer vom Start des Experiments bis zum Austrocknen des Blattes. Diese Unterschiede können sowohl von individuellen Unterschieden der Pflanzen herrühren als auch durch einen unterschiedlich großen Wasservorrat in den Töpfen der Pflanzen beim Start der Messreihen entstanden sein. Da in diesem Versuchsaufbau das Gewicht der Töpfe nicht aufgezeichnet wurde, lassen sich diese beiden möglichen Ursachen nicht voneinander trennen. Um den Verlauf der Kurven dennoch übersichtlich und vergleichbar darzustellen, wurde in Abb. 3.39 die Zeitachse der einzelnen Messreihen an dem Tag ausgerichtet, an dem die Transmission der THz-Strahlung durch das Blatt ihr Maximum erreichte. Die Werte, um die die Messreihen in der Darstellung verschoben wurden, sind in der Abbildung mit angegeben. Insgesamt zeigt sich ein ähnliches Bild wie in den Messreihen in den Abbildungen 3.9, 3.10 und 3.11, die mit dem fasergekoppelten THz-Zeitbereichsspektrometer aufgenommen wurden. Die Messwerte bleiben zunächst auf einem mehr oder weniger konstanten Niveau, bis die Austrocknung des Blattes beginnt, was durch einen Anstieg der transmittierten THz-Amplitude sichtbar wird. Dieser findet hauptsächlich tagsüber statt und kommt nachts zum Stillstand oder ist sogar leicht rückläufig. Diese vom Wechsel zwischen Tag und Nacht abhän-

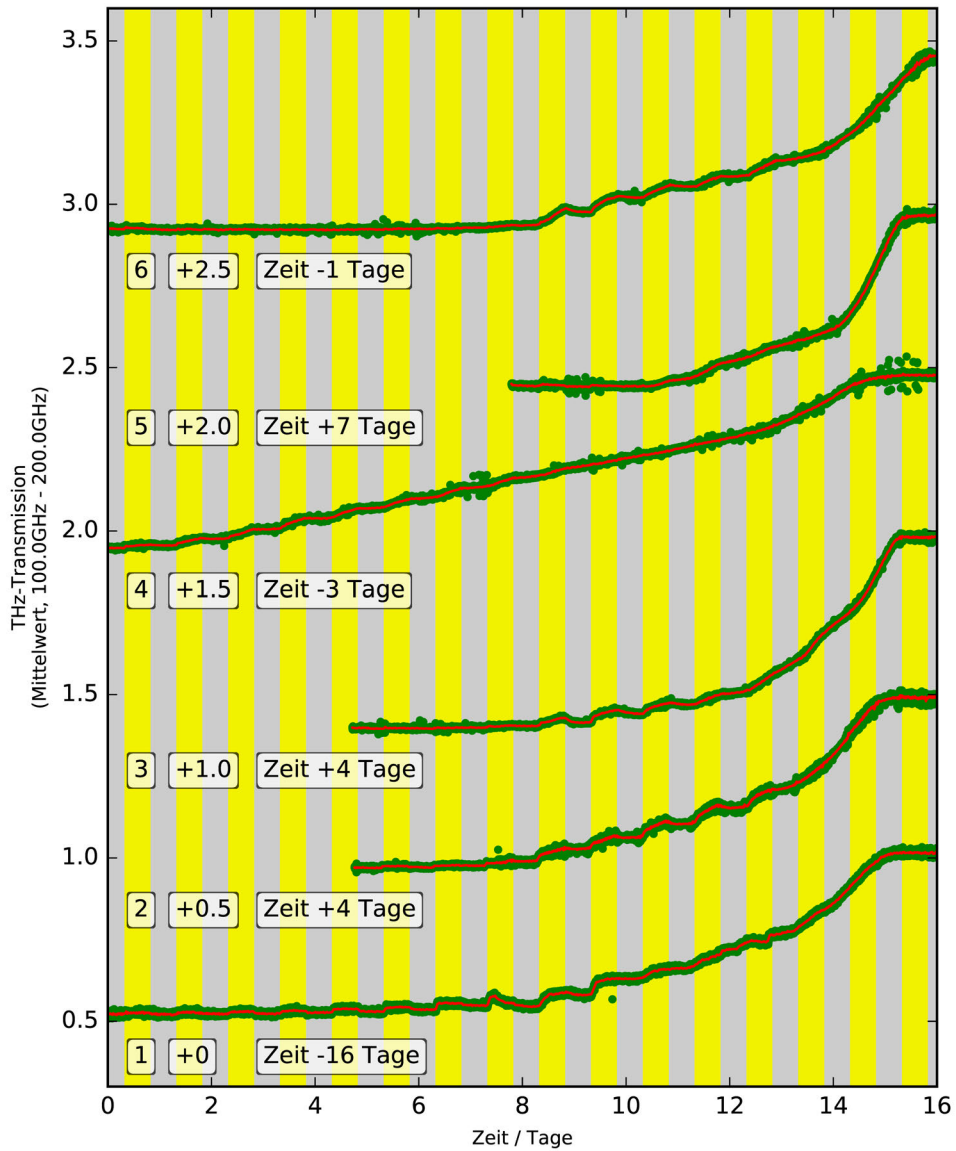


Abbildung 3.39.: Die hier dargestellten Messreihen, die mit dem QTDS-Aufbau aufgenommen wurden, zeigen die Austrocknung von jeweils einem Blatt an sechs verschiedenen Roggenpflanzen. Die Nummerierung der Messreihen gibt die Reihenfolge an, in der diese durchgeführt wurden. Zusätzlich sind die für die grafische Darstellung verwendeten Offset-Werte angegeben.

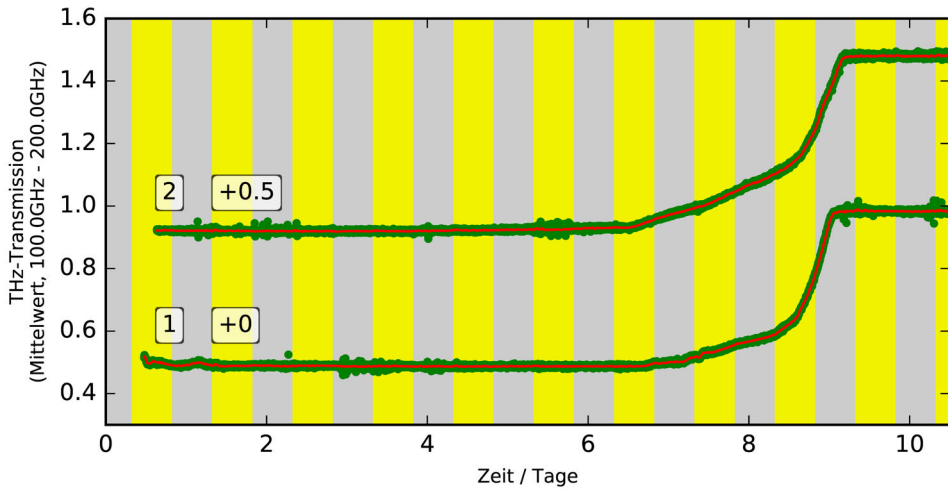


Abbildung 3.40.: Die hier dargestellten mit dem QTDS-Aufbau durchgeführten Messreihen zeigen jeweils die Austrocknung eines Blattes von einer Sojapflanze. Im Vergleich mit den meisten anderen untersuchten Pflanzen vertrocknen die Sojapflanzen relativ schnell, wenn die Austrocknung einmal begonnen hat.

gigen Schwankungen treten allerdings nur am Anfang der Austrocknung auf. Nach dem Überschreiten einer gewissen Schwelle steigt die Transmission monoton und nahezu unabhängig von Tag und Nacht. Dies entspricht den unter 3.1.8.1 beschriebenen Beobachtungen. Im Vergleich mit den Messreihen mit dem fasergekoppelten THz-Zeitbereichsspektrometer lässt sich dieses Verhalten insbesondere in Abb. 3.11 wiederfinden.

In den Messreihen mit den beiden Sojapflanzen zeigt sich auch hier ein ähnliches Verhalten wie schon zuvor in den Messreihen mit dem fasergekoppelten THz-Zeitbereichsspektrometer in Abb. 3.19, 3.20 und 3.21 dargestellt. Auch dort neigen die Blätter der Sojapflanzen dazu, im Vergleich mit den anderen untersuchten Pflanzenarten innerhalb eines vergleichsweise kurzen Zeitraums von 2-3 Tagen zu

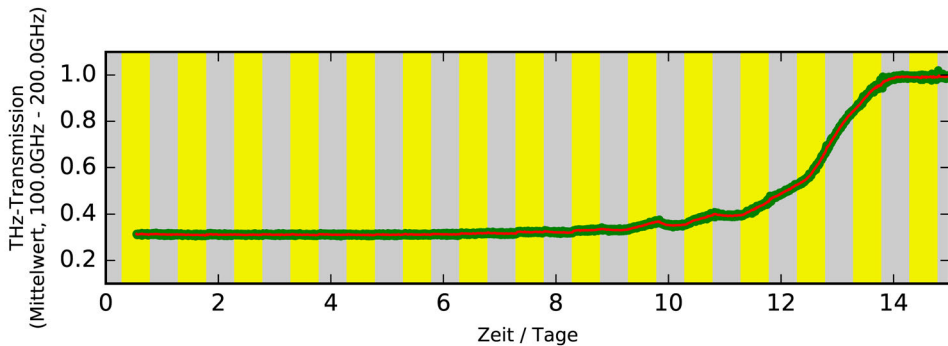


Abbildung 3.41.: Diese mit dem QTDS-Aufbau aufgenommene Messreihe zeigt die Austrocknung eines Blattes an einer Maispflanze. Auch diese Messreihe ist in guter Übereinstimmung mit den Messreihen, die mit dem fasergekoppelten THz-Zeitbereichsspektrometer aufgenommen wurden.

vertrocknen, nachdem die Austrocknung einmal begonnen hat. Auffällig ist hier allerdings, dass nicht, wie sonst meist beobachtet, zu Beginn der Austrocknung zunächst Schwankungen zwischen Tag und Nacht auftreten.

Schließlich zeigt Abb. 3.41 eine Messreihe mit einer Maispflanze, die in guter Übereinstimmung mit den in den Abbildungen 3.15 bis 3.18 dargestellten Messreihen mit Maispflanzen und dem fasergekoppelten THz-Zeitbereichsspektrometer steht.

3.3.3. Kompakt-Aufbau

Die Signale, die auf der Ebene der in einem THz-Zeitbereichsspektrometer eingesetzten Elektronik verarbeitet werden müssen, liegen bei gut beherrschbaren Frequenzen von einigen Kilohertz. Für diese Art von Signalen sind als Alternative zu spezialisierter und damit teurer Labortechnik Komponenten aus dem Bereich der Audiotechnik gut geeignet, die als preiswerte Massenware erhältlich sind [170]. Die Frequenz, mit der für das Lock-In-Verfahren die Vorspannung der Emitter-Antenne moduliert wird, kann ohne weiteres so gewählt werden, dass sie von einem gewöhnlichen Audio-Interface, wie es sonst für die Ton-Ein- und Ausgabe an einem PC genutzt wird, verarbeitet werden kann. Hier kommt an Stelle eines PCs ein Einplatinencomputer des Typs Raspberry PI 2 Model B zum Einsatz. Dieser wird durch ein Audiointerface der Firma Cirrus Logic ergänzt. Diese Kombination von Komponenten ist zugleich kompakt, energiesparend und preisgünstig. Das Audiointerface besitzt zwei Ausgangs- und zwei Eingangs-Kanäle. Auf beiden Ausgangskanälen wird in identischer Form das Signal zur Modulation der Emitter-Antenne ausgegeben. Einer der beiden Ausgänge ist auf direktem Weg mit einem der beiden Eingänge verbunden, um das für das Lock-In-Verfahren benötigte Referenzsignal aufzunehmen. An den zweiten Eingang ist die Detektor-Antenne angeschlossen. Allerdings müssen für die Verbindung der photoleitenden Antennen mit den Ein- und Ausgängen des Audiointerface die Signalpegel durch zusätzliche Elektronik angepasst werden.

Für die Vorspannung der Emitter-Antenne wurde ein Spannungsverstärker auf Grundlage eines Operationsverstärkers (Typ OPA 604) aufgebaut. Dieser wurde als invertierender Verstärker mit einem Verstärkungsfaktor von 20 beschaltet. Ein vom Audiointerface ausgegebenes Signal mit einer Amplitude von ± 1 V wird so auf eine Amplitude von ± 20 V verstärkt. Der durch die invertierende Beschaltung verursachte Phasenversatz muss bei der Implementierung des Lock-In-Verfahrens berücksichtigt werden. Die Versorgungsspannung von ± 24 V für den Operationsverstärker wird von einem integrierten Spannungswandler des Typs XP Power IH1224S-H bereitgestellt. Der Operationsverstärker ist darauf ausgelegt, Lasten von mindestens 600Ω zu treiben. Bei einem Widerstand der Emitter-Antenne in der Größenordnung von $100 \text{ k}\Omega$ erfüllt also schon diese einfache Schaltung ihren Zweck und es wird kein zusätzlicher Ausgangstreiber benötigt.

Um den in der Detektor-Antenne induzierten Strom mit dem Audiointerface aufnehmen zu können, wird ein Transimpedanzverstärker benötigt. Dieser wurde als mehrstufiger Verstärker aus mehreren Operationsverstärkern aufgebaut, wobei in die Schaltung ein Bandpassfilter integriert wurde, der schon auf der Ebene der analogen Signalverarbeitung eine Vorfilterung vornimmt, um das Lock-In-Verfahren zu unterstützen. Den eigentlichen Transimpedanzverstärker bildet ein Operationsverstärker (Typ OPA 134), der mit einem Rückkopplungswiderstand von $10 \text{ M}\Omega$ eine

Verstärkung von 10^7 V/A erreicht. Um einen eventuellen Gleichspannungs-Anteil aus dem Signal zu entfernen, ist die Verbindung zur nächsten Stufe des Verstärkers kapazitiv über einen Kondensator (100 nF) realisiert. Auf diesen Hochpass folgen zwei Operationsverstärker, die als Tiefpassfilter mit Butterworth-Charakteristik beschaltet wurden. Nach der Filterung folgt ein als invertierender Spannungsverstärker beschalteter Operationsverstärker, dessen Verstärkungsfaktor über ein Trimmerpoti eingestellt werden kann, um die Gesamtverstärkung der Schaltung zu regulieren. Schließlich folgt als Ausgangstreiber ein als Spannungsfolger beschalteter Operationsverstärker. Die Amplitude des Ausgangssignals wird über zwei Dioden auf ca. $\pm 1,2$ V begrenzt, um den Eingang des Audiointerface vor Übersteuerung und Beschädigung zu schützen. Der in dieser Schaltung integrierte Tiefpassfilter hat sich als nützlich erwiesen, da das Nutzsignal vor der Filterung von einem störenden zusätzlichen Signal bei einer Frequenz von ca. 80 kHz überlagert ist, welches vermutlich aus der Treiberelektronik der Laserdiode stammt. Nachdem diese Störung aus dem Signal entfernt ist, kann der Eingang des Audio-Interface wesentlich weiter ausgesteuert werden, so dass der Dynamikumfang von dessen Analog-Digital-Wandler besser genutzt werden kann.

Die softwaretechnische Umsetzung des Lock-In-Verfahrens erfolgte in der Programmiersprache Python 3. Dazu wurde ein vergleichsweise einfacher und somit bei der Berechnung effizienter Ansatz gewählt. Die verschiedenen anfallenden Aufgaben wurden auf mehrere parallel laufende Threads aufgeteilt. Ein Thread generiert das sinusförmige Signal, welches zur Modulation der Vorspannung der Emitter-Antenne verwendet wird. Ein zweiter Thread liest kontinuierlich die vom Analog-Digital-Wandler des Audiointerface kommenden Daten, die sowohl das vom Transimpedanzverstärker aufgenommene Signal als auch das aus dem Ausgang direkt wieder eingespeiste Referenzsignal enthalten. Die aufgezeichneten Daten werden kontinuierlich in einen Ringpuffer geschrieben, dessen Länge der Integrationszeit des Lock-In-Verfahrens entspricht. Ein dritter Thread liest auf Anforderung den Ringpuffer aus und führt das eigentliche Lock-In-Verfahren durch. Zur effizienten Nutzung der begrenzten Rechenleistung des verwendeten Kleincomputers werden diese Berechnungen also nur dann ausgeführt, wenn das Ergebnis tatsächlich als Messwert benötigt wird.

Da das Referenzsignal innerhalb der Software erzeugt wird und für dessen Ausgabe und Aufnahme dasselbe Audiointerface verwendet wird, ist seine Frequenz bereits bekannt und nur die Phasenlage muss bestimmt werden. Dazu werden die folgenden beiden Hilfssignale generiert:

$$y_{\sin}(t_k) = \sin(2\pi f_{ref} t_k), \quad t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, N\Delta t, \quad N\Delta t = t_{int}$$

$$y_{\cos}(t_k) = \cos(2\pi f_{ref} t_k), \quad t = 0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, N\Delta t$$

Amplitude und Phase des Referenzsignals ergeben sich nun ähnlich zur diskreten Fouriertransformation als:

$$Y_{ref} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N y_{\sin}(t_k) y_{ref}(t_k) + i \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N y_{\cos}(t_k) y_{ref}(t_k)$$

Die gesuchte Phase des Referenzsignals ist also der Phasenwinkel $\phi_{ref} = \angle Y_{ref}$. Analog dazu wird auch das eigentliche Nutzsignal behandelt:

$$\tilde{Y}_{signal} = \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N y_{sin}(t_k) y_{signal}(t_k) + i \frac{2}{N} \sum_{k=0}^N y_{cos}(t_k) y_{signal}(t_k)$$

Der Phasenbezug zum Referenzsignal wird nun folgendermaßen hergestellt:

$$Y_{signal} = \tilde{Y}_{signal} \cdot e^{-i(\phi_{ref} + \phi_{const})}$$

Dabei ist ϕ_{const} eine zusätzliche Konstante, die für den Phasenversatz durch die Signallaufzeiten im Versuchsaufbau und der dort eingesetzten Elektronik steht. Bei passender Wahl von ϕ_{const} ist die gesuchte Amplitude des in der Detektor-Antenne induzierten Stroms im Realteil von Y_{signal} zu finden:

$$I_{det} = C \cdot \Re(Y_{signal})$$

C ist dabei ein Proportionalitätsfaktor, der sich aus der Verstärkung des Transimpedanzverstärkers und dem Wertebereich des Analog-Digital-Wandlers ergibt.

Bei der Aufnahme eines THz-Pulses mittels dieses Verfahrens wird dieser durch eine schrittweise Bewegung der Verzögerungsstrecke abgerastert. Während der Aufnahme der einzelnen Messwerte steht die Verzögerungsstrecke still, so dass keine Verarbeitung der Messdaten in Echtzeit notwendig ist. Verglichen mit der unter 2.3.2 beschriebenen kontinuierlichen Bewegung der Verzögerungsstrecke nimmt diese Vorgehensweise etwas mehr Zeit in Anspruch. Dies kann hier jedoch vernachlässigt werden, da die Geschwindigkeit der Messungen für die Wasserstatusüberwachung einer Pflanze dennoch vollkommen ausreichend ist.

Die Stromversorgung der einzelnen Komponenten des THz-Quasi-Zeitbereichs-Spektrometers wurde so gestaltet, dass das komplette Spektrometer mit einer einzelnen Betriebsspannung von 12 V betrieben werden kann. Somit ist auch ein vom Stromnetz unabhängiger Betrieb mit einem Akku als Stromversorgung möglich.

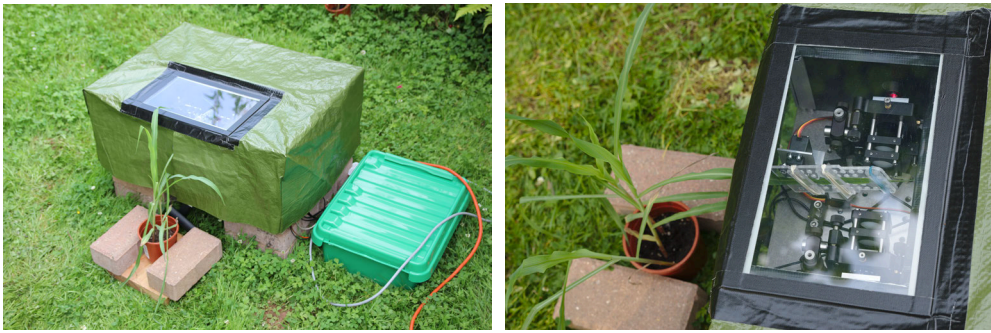


Abbildung 3.42.: Das QTDs-Spektrometer wurde mit einer wetterfesten Hülle ausgestattet, so dass Messungen im Freien unter natürlichen Umweltbedingungen möglich sind. Im Bild rechts ist die Messkammer mit dem in die Positioniereinheit eingespannten Blatt zu sehen.

3.3.4. Freiland-Messungen

Die Durchführung der bisherigen Messreihen unter kontrollierten Laborbedingungen ist der Reproduzierbarkeit der Versuche zuträglich. Allerdings werden dadurch viele Einflüsse ausgeblendet, denen Pflanzen unter natürlichen Bedingungen im Freien normalerweise ausgesetzt sind. Dazu gehören z.B. unterschiedlich starke Sonneneinstrahlung im Tagesverlauf, Wind und Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht. Um auch diese Einflüsse zu berücksichtigen, ist es notwendig, den Versuchsaufbau aus dem Labor ins Freie zu bringen, so dass die Pflanzen in ihrem natürlichen Umfeld untersucht werden können. Auch im Hinblick auf eine Überwachung des Wasserstatus von Pflanzen im Anbau ist es notwendig, die im Labor erprobte Messtechnik auf den Feldeinsatz vorzubereiten.

Wie oben beschrieben wurde die Elektronik des THz-Quasi-Zeitbereichs-Spektrometers so konstruiert, dass ein autonomer Betrieb außerhalb des Labors möglich ist. Zum Schutz des Versuchsaufbaus wurde für diesen aus einer robusten Plane ein wetterfester Überzug hergestellt. Dieser beinhaltet eine Fensterscheibe über der Messkammer, in die das untersuchte Blatt durch einen Schlitz in der Plane eingeführt wird. Der Überzug bietet Schutz gegenüber Regen und Taunässe, schließt aber nicht luftdicht ab, so dass ein Luftaustausch zwischen der Messkammer und der Umgebung möglich ist. Dieser Aufbau ist in den Fotos in Abb. 3.42 zu sehen. Im Unterschied zu den Messungen im Labor wird hier für den Wechsel zwischen Referenz- und Probe-Messungen nicht die ganze Pflanze vor- und zurückbewegt. Stattdessen wird nur der Probenhalter mit dem untersuchten Blatt in den Strahlengang hinein- und wieder herausgeschwenkt. Zu diesem Zweck ist der Probenhalter im Inneren der Messkammer auf einem Servomotor aus dem Modellbaubereich montiert. Die Bewegung, die so mit dem Blatt ausgeführt wird, liegt in derselben Größenordnung wie auch die Bewegung durch den Wind, der die Blätter einer Pflanze im Freien ausgesetzt sind, so dass das Blatt nicht unzulässig stark verbogen wird. Die untersuchte Maispflanze befand sich in der durchgeführten Messreihe zwar in einem Topf, dieser stand jedoch während der Messreihe an einer festen Position. Für den technischen Ablauf der Messungen entsprach dies also einer im Boden verwurzelten Pflanze.

Die Messreihe mit der Maispflanze lief über einen Zeitraum von insgesamt zwei Tagen und Nächten. Die Pflanze wurde während des Versuchs nicht bewässert, stand

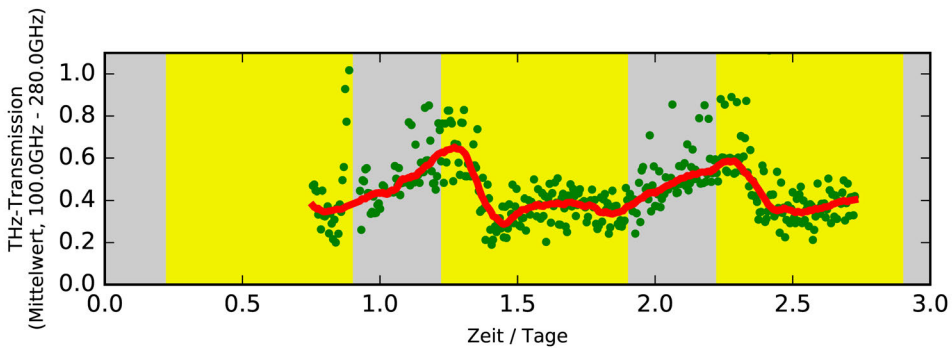


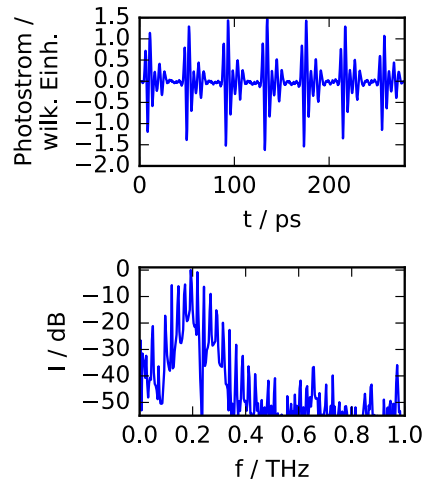
Abbildung 3.43.: Der Blattwassergehalt einer Maispflanze wurde über einen Zeitraum von zwei Tagen überwacht. Die Unterscheidung zwischen Tag (gelb) und Nacht (grau) richtet sich hier nach den Zeiten des Sonnenaufgangs und Sonnenuntergangs. Im Tagesverlauf ist vom Vormittag bis zum frühen Abend ein leichter Anstieg der Transmission, d.h. eine leichte Abnahme des Blattwassergehalts sichtbar. Auf den ersten Blick überraschend ist die wesentlich stärkere Abnahme des Blattwassergehalts in der Nacht. Diese lässt sich jedoch durch eine verminderte Wasseraufnahme der Pflanzen aufgrund der niedrigeren Umgebungstemperatur in der Nacht erklären.

aber noch nicht unter starkem Trockenstress. Der zeitliche Verlauf der Transmittierten THz-Amplitude durch das untersuchte Blatt ist in Abb. 3.43 dargestellt. Die auffälligste Eigenschaft des Kurvenverlaufs ist der Anstieg der Transmission während der Nacht, der auf einen deutlichen Wasserverlust hindeutet. Dieser Wasserverlust wird am darauffolgenden Tag im Laufe des Vormittags wieder ausgeglichen. Im weiteren Verlauf des Tages verliert das Blatt bis zum Nachmittag wieder geringfügig an Wasser. Bis zum Abend wird auch dieser Verlust wieder ausgeglichen, bevor in der nächsten Nacht wieder ein wesentlich größerer Wasserverlust auftritt. Der moderate Wasserverlust am Nachmittag stimmt mit den Laborexperimenten überein und lässt sich durch verstärkte Transpiration aufgrund der Sonneneinstrahlung erklären. Der Wasserverlust während der Nacht hingegen war anhand der Laborexperimente nicht vorhersagbar. Auf den ersten Blick wäre die Vermutung naheliegend, dass die Pflanze über Nacht einen konstanten Wassergehalt aufrecht erhält oder sogar noch etwas mehr Wasser aufnimmt. Die Ursache dafür, dass stattdessen ein deutlicher Abfall des Blattwassergehalts auftritt, muss in den Unterschieden zwischen den Umgebungsbedingungen im Labor und im Freien gesucht werden. Einer dieser Unterschiede besteht darin, dass die Lufttemperatur im Labor durch die Klimaanlage weitgehend konstant auf einer Temperatur von ca. 20°C gehalten wird, während im Freien ein deutlicher Temperaturunterschied zwischen Tag und Nacht auftrat. An den Tagen des Experiments betrug die Lufttemperatur tagsüber ca. 25°C und nachts ca. 10°C. An dieser Stelle sollte berücksichtigt werden, dass die dielektrischen Eigenschaften von Wasser temperaturabhängig sind, was insbesondere auch den Absorptionskoeffizienten betrifft. Da niedrigere Temperaturen zu einer schwächeren Absorption der THz-Strahlung führen, liegt die Vermutung nahe, dass sich der beobachtete Effekt so erklären lässt. Unter der Annahme, dass der beobachtete Effekt alleine auf der Temperaturänderung beruht, lässt sich abschätzen, wie groß die Änderung der Transmission in diesem Fall ausfallen dürfte. Anhand der von Ronne et al. experimentell ermittelten Werte der Permittivität von Wasser bei

verschiedenen Temperaturen ergibt sich unter dieser Annahme bei einer anfänglichen Transmission von 35% während des Tages eine Steigerung der Transmission um ca. 10 Prozentpunkte während der um 15°C kälteren Nacht. Der tatsächlich in der hier vorliegenden Messreihe beobachtete Anstieg der Transmission während der Nacht beträgt jedoch ca. 30 Prozentpunkte, was auf einen verringerten Wassergehalt des untersuchten Blattes schließen lässt. Die Ergebnisse der Experimente von Barlow et al. [171], Janowiak und Markowski [172] und Kościelniak [173], in denen der Einfluss der Temperatur der Luft und des Bodens auf den Wasserstatus und andere Eigenschaften von Maispflanzen untersucht wurden, stehen im Einklang mit der hier zunächst überraschenden Beobachtung des Wasserverlusts in der Nacht. Auch in diesen Experimenten wurde ein Rückgang des Blattwassergehalts bei niedrigeren Temperaturen festgestellt. Dies wird mit einer schlechteren Fähigkeit der Maispflanzen zur Wasseraufnahme erklärt, wenn die Temperatur der Luft und insbesondere des Bodens eine gewisse Schwelle unterschreitet. Dafür, dass der Effekt hier in der Messreihe mit dem THz-Quasi-Zeitbereichs-Spektrometer so deutlich hervortritt, kommen verschiedene Ursachen in Frage, die ggf. auch in Kombination zur Erklärung der Stärke des nächtlichen Wasserverlusts herangezogen werden können. Einerseits ist die für die Messungen verwendete Pflanze im Labor herangewachsen und wurde erst für das Experiment ins Freie gebracht. Die Pflanze war also zuvor ausschließlich der konstanten Lufttemperatur des Labors ausgesetzt, so dass keinerlei Akklimatisation an die nächtliche Abkühlung stattfinden konnte. Hinzu kommt, dass die Pflanze nicht im Erdreich verwurzelt war, sondern sich in einem Topf befand, der von allen Seiten der Umgebungsluft ausgesetzt war. Dementsprechend ist anzunehmen, dass auch die Erde im Topf in der Nacht etwas stärker abgekühlt ist als dies für das Erdreich der Fall ist, das insgesamt eine wesentlich größere Wärmekapazität besitzt.

Das Ergebnis der Messreihe zeigt, dass die THz-QTDS-Messtechnik dazu geeignet ist, auch im Freien unter realen Umweltbedingungen Experimente mit Pflanzen durchzuführen. Auf diese Weise können die Ergebnisse der Laborexperimente verifiziert werden, bzw. es können deren Grenzen in Bezug auf die Übertragbarkeit ihrer Ergebnisse auf Pflanzen im Freien ausgelotet werden.

Zur Erprobung eines autonomen, netzunabhängigen Betriebs des Spektrometers, wurde dessen Stromversorgung auf einen 12V-Bleiakku (Autobatterie) umgestellt. Auch die zuvor kabelgebundene Netzwerkverbindung des in das Spektrometer integrierten Einplatinencomputers wurde gekappt und durch eine WLAN-Funkverbindung ersetzt. Abb. 3.44 zeigt den in dieser Konfiguration im Freien aufgebauten Versuchsaufbau zusammen mit einem im netzunabhängigen Betrieb aufgezeichneten QTDS-Pulszug.



(a) Der Versuchsaufbau im netzunabhängigen Betrieb

(b) Ein in dieser Konfiguration aufgezeichneter QTDS-Pulszug

Abbildung 3.44.: Um einen autonomen Betrieb des Messsystems zu ermöglichen, wurde die Stromversorgung auf eine Autobatterie umgestellt. Die Kontrolle der Messungen und das Auslesen der Messdaten erfolgen über WLAN. Es handelt sich also um ein Insel-System ohne jegliche Kabelverbindung nach außen.

3.4. Qualitätskontrolle von Rüben-Saatgut

Noch bevor sich die Frage des Wasserverbrauchs oder der angemessenen Bewässerung einer Pflanze stellt, muss die Pflanze zunächst überhaupt entstehen. In den allermeisten Fällen geschieht dies durch das Aussäen und Keimen eines Samens. Gerade bei der Verwendung in der Landwirtschaft ist es dabei wichtig, dass das Keimen der Samen zuverlässig funktioniert. Aus diesem Grund ist eine hohe Qualität des Saatguts gefordert, die einerseits schon während dessen Produktion und Ernte maximiert werden sollte [174–176]. Andererseits wird die Qualität des Saatguts aber auch durch eine nachträgliche Kontrolle sichergestellt, da nicht alle Pflanzen von Natur aus Saatgut produzieren, das mit der gewünschten hohen Wahrscheinlichkeit keimfähig ist. Insbesondere das Saatgut von Zuckerrüben ist von dieser Problematik betroffen, was dazu führt, dass ca. 35-40% des Saatguts bei der Qualitätskontrolle aussortiert werden [174]. Das Verfahren, welches für diesen Sortierprozess angewendet wird, ist arbeitsintensiv und zeitaufwendig. Von einer Stichprobe der Samen werden Röntgenaufnahmen angefertigt, um festzustellen, ob sich Embryos in den Samen befinden, was bedeutet, dass diese mit hoher Wahrscheinlichkeit keimfähig sind [174]. Da die Samen mit Embryo tendenziell etwas schwerer sind, kann ein Schwellenwert ermittelt werden, um die Samen anhand ihres Gewichts zu sortieren. Dieser Schwellenwert muss aber für jede Charge und jede Größenklasse von Samen erneut bestimmt werden.

Im Folgenden wird ein Verfahren beschrieben, das unter Einsatz der THz-Spektroskopie als Alternative zur Anfertigung der Röntgenaufnahmen dienen kann. Dies ist einerseits deshalb von Vorteil, weil die nicht-ionisierende THz-Strahlung im Gegensatz zur Röntgenstrahlung keine besonderen Sicherheitsvorkehrungen erfordert. Andererseits besteht prinzipiell die Möglichkeit, den Vorgang der THz-Messungen zu automatisieren, so dass der Anteil der Samen, die direkt untersucht und nicht nur anhand ihres Gewichts sortiert werden, gesteigert werden kann.

Die Messungen wurden mittels eines fasergekoppelten THz-Zeitbereichsspektrometers mit Freistrahl-Verzögerungsstrecke ausgeführt (vgl. Abb. 2.1b). Durch vier HDPE-Linsen mit einer Brennweite von 60 mm wird zwischen den beiden fasergekoppelten Antennenmodulen ein geradliniger THz-Strahlengang mit einem Zwischenfokus gebildet. Die Antennenmodule und Linsen sind auf eine Schiene aus Aluminium montiert, so dass der komplette THz-Strahlengang senkrecht gestellt werden kann. Die in den Zwischenfokus eingebrachte Lochblende mit einem Durchmesser von 1,5 mm liegt somit in einer waagerechten Ebene. So können die Samen für die Messungen einfach auf der Lochblende abgelegt werden, ohne dass eine zusätzliche Befestigung in einem Probenhalter nötig wäre.

In den Messungen wurden insgesamt 100 Samen untersucht, die alle derselben Größenklasse angehören. Diese Samen wurden durch Röntgenaufnahmen vorsortiert und so ausgewählt, dass für die Messungen 50 Samen mit und 50 Samen ohne Embryo zur Verfügung standen. Die Samen haben eine ungefähr linsenartige Form und besitzen an ihrem Rand einen Kragen aus einem holzigen Material, durch das sie zuvor mit der Pflanze verbunden waren. Für die Messungen wurden die Samen von Hand so auf der Lochblende platziert, dass dieser Kragen parallel zur Ebene der Lochblende liegt. Unterschiede zwischen der Ober- und Unterseite der Samen, die in ihrem Inneren vorhanden sein könnten, waren von außen nicht zu erkennen, so

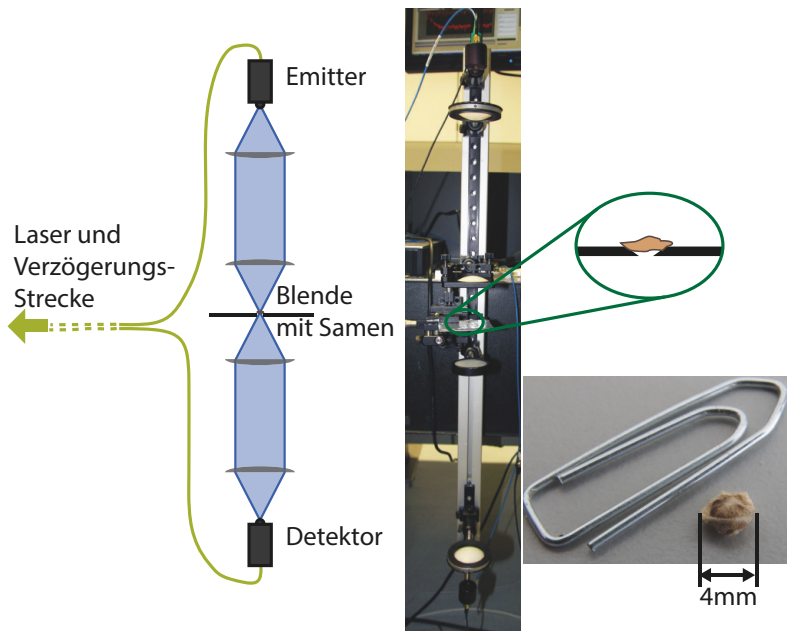


Abbildung 3.45.: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Das kleinere Foto zeigt einen Rübensamen mit einer Büroklammer zum Größenvergleich. (vgl. [177], Abb. 1)

dass diese Ausrichtung zufällig gewählt wurde. Für jede Messung mit einem Samen wurde zusätzlich eine Referenzmessung durch die leere Lochblende aufgenommen. In Gruppen von jeweils zehn Samen wurde zwischen „guten“ und „schlechten“ Samen abgewechselt. So wurde sichergestellt, dass ein in den Messungen gefundener Unterschied seinen Ursprung tatsächlich in den verschiedenen Samen hat. Wenn stattdessen z.B. zuerst alle „guten“ und anschließend alle „schlechten“ Samen untersucht würden, wäre nicht auszuschließen, dass ein vermeintlicher Unterschied seinen Ursprung in Wahrheit in einem Drift des kompletten Messsystems hat.

Wie Abb. 3.46 zeigt ist auch ohne irgendeine Weiterverarbeitung der Unterschied zwischen „guten“ und „schlechten“ Samen in den THz-Zeitbereichsdaten schon deutlich sichtbar. Tendenziell besitzen Samen, die einen Embryo enthalten, ein höheres Gewicht und einen höheren Wassergehalt. Die stärkere Absorption der THz-Strahlung in den „guten“ Samen lässt sich also diesem Effekt zuschreiben. Die Form der THz-Pulse im Zeitbereich wird aber auch durch die Eigenschaften des Messsystems maßgeblich bestimmt. Es ist also wünschenswert, die Auswertung der Messdaten so zu gestalten, dass sie soweit wie möglich nur von den Proben abhängt und den Einfluss des Messsystems minimiert. Dieses Ziel wird durch die in Gleichung (2.4) definierte Übertragungsfunktion erreicht, die im Frequenzbereich das Ergebnis der Messung mit der Probe zur Referenzmessung mit dem leeren Messsystem in Bezug setzt. Nach der Transformation in den Frequenzbereich zeigt sich, dass sich der Unterschied zwischen „guten“ und „schlechten“ Samen gut an der Phaseninformation des Signals festmachen lässt. Da die Phaseninformation in der Übertragungsfunktion nur über ein Intervall von 2π eindeutig ist, wird darauf zunächst eine „unwrap“-Routine angewendet, die Sprünge von 2π durch das Addieren eines entsprechenden Offsets eliminiert. Anschließend zeigt sich der Unterschied zwischen den beiden Gruppen von

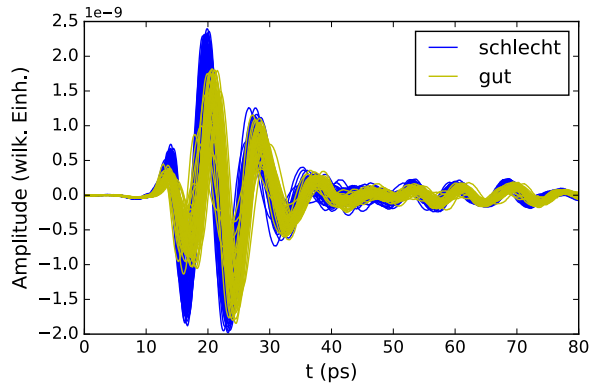


Abbildung 3.46.: Schon die unverarbeiteten Zeitbereichsdaten zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen „guten“ und „schlechten“ Samen. (vgl. [177], Abb. 2)

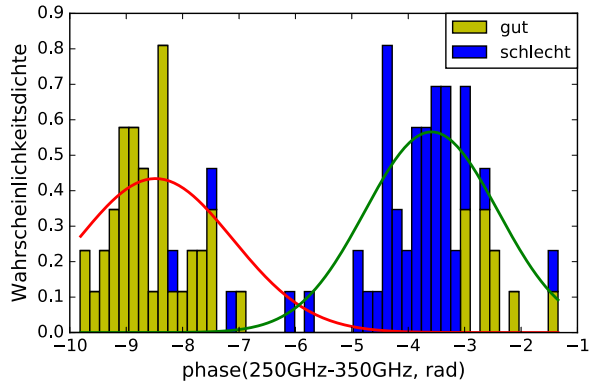


Abbildung 3.47.: Die Phase des THz-Signals im Frequenzfenster von 250 GHz bis 350 GHz erlaubt durch Anpassung eines Gauß-Mischungs-Modells die Unterscheidung von „guten“ und „schlechten“ Samen. (vgl. [177], Abb. 3)

Samen insbesondere im Frequenzfenster von 250 GHz bis 350 GHz. Dabei ist zu beachten, dass einerseits der Durchmesser des Zwischenfokus des THz-Strahlengangs größer ist als der Durchmesser der Öffnung der Lochblende, und andererseits der Samen sich nicht bloß vor der Lochblende befindet, sondern ein Stück weit in die Vertiefung in dem als Blende dienenden Aluminiumblech hineinragt. Das bedeutet, dass das Ergebnis nicht alleine durch die Samen bestimmt wird, sondern durch die Kombination aus Lochblende und Samen. Es ist also damit zu rechnen, dass das auszuwertende Frequenzfenster im Fall eines anderen Blendendurchmessers oder einer anderen Größenklasse von Samen neu bestimmt werden muss. Für jeden Samen wurde in dem hier verwendeten Frequenzfenster der Mittelwert des Phasenwinkels berechnet. Die Verteilung dieser Werte ist in Abb. 3.47 dargestellt. Es zeigen sich zwei weitgehend voneinander separierte Ansammlungen von Messwerten, die bis auf wenige Ausnahmen die beiden Gruppen von Samen widerspiegeln. Diese Art von Verteilung lässt sich gut durch ein sogenanntes Gauß-Mischungs-Modell beschreiben [178]. Ein solches beschreibt eine Wahrscheinlichkeitsverteilung als die Summe von zwei oder mehr im allgemeinen unterschiedlich gewichteten Gauß'schen Normalverteilungen. Die Parameter und Gewichtungen der einzelnen Verteilungen werden

durch die Maximum-Likelihood-Methode bestimmt. Unter der Annahme von einem gegebenen Parametersatz lässt sich die Wahrscheinlichkeit errechnen, die sich unter diesen Annahmen für die bei den Messungen ermittelten Messwerte ergibt. Die Grundidee der Maximum-Likelihood-Methode besteht darin, nach demjenigen Parametersatz für das Mischungsmodell zu suchen, bei dem die Wahrscheinlichkeit der aufgetretenen Messwerte maximal wird. Für diese Berechnung kommt hier das Python-Paket „scikit-learn“ zum Einsatz [179]. Für den so bestimmten Parametersatz wird im Umkehrschluss angenommen, dass er die bestmögliche Beschreibung der „wahren“ Verteilung darstellt, die den Messwerten zugrunde liegt. Anhand dieser Verteilung lässt sich anschließend für die einzelnen Samen entscheiden, ob es wahrscheinlicher ist, dass sie jeweils der einen oder der anderen Gruppe angehören. Von den in den Messungen untersuchten Samen wurden durch diese Methode insgesamt 87% in Übereinstimmung mit der Röntgen-Untersuchung als „gut“ oder „schlecht“ zugeordnet. Im Einzelnen wurden 80% der „guten“ und 94% der „schlechten“ korrekt erkannt. In der praktischen Anwendung ist die Erkennungsrate der „schlechten“ Samen besonders wichtig, um diese zuverlässig auszusortieren. Die „guten“ Samen zuverlässig zu erkennen ist wünschenswert, um unnötigen Ausschuss zu minimieren. Dennoch ist es eher akzeptabel, einige „gute“ Samen unnötigerweise zu entsorgen, als zu viele „schlechte“ Samen zu behalten und diese letztendlich auf dem Feld auszusäen.

Eine wichtige Eigenschaft der hier zur Erkennung der Samen angewendeten Methode ist, dass diese keine vorsortierten Trainingsdaten benötigt. Die Vorsortierung durch die Röntgenaufnahmen dient ausschließlich zur Überprüfung des Ergebnisses, aber geht nicht in die eigentliche Auswertung ein. Die Kalibration der Erkennung der Samen geschieht automatisch durch die Anpassung des Gauß-Mischungs-Modells an die Verteilung der Messwerte. Um eine Aussage über einen einzelnen Samen treffen zu können, muss zunächst eine gewisse Mindest-Anzahl an Samen untersucht worden sein. Die Datenauswertung kann so implementiert werden, dass das Gauß-Mischungs-Modell mit jeder neuen Einzelmessung aktualisiert wird. Die Erkennungsgenauigkeit verbessert sich in diesem Fall schrittweise mit der Anzahl der untersuchten Samen.

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass es sich bei der Untersuchung von Saatgut mittels THz-Spektroskopie um eine vielversprechende Technologie handelt, die das Potenzial dazu besitzt, in Zukunft die aufwendigen Röntgenuntersuchungen abzulösen.

4. Sub-THz: kontaktlose Messung an ganzen Pflanzen

Die in Kapitel 3 dargestellten Verfahren, um mittels THz-Spektroskopie den Blattwassergehalt zu messen, haben gemeinsam, dass die Messungen an einzelnen Pflanzen der Blätter stattfinden. Ein alternativer Ansatz besteht darin, eine Pflanze komplett oder zumindest zu einem großen Teil in die Messungen einzubeziehen. Für diese Art von Messungen bietet sich der auch als Sub-THz-Bereich bezeichnete obere Mikrowellenbereich an. Auch in diesem Frequenzbereich besteht ein deutlicher Kontrast in der Absorption der Strahlung zwischen flüssigem Wasser und festem Pflanzenmaterial. Die bedingt durch die größere Wellenlänge geringere räumliche Auflösung stellt keinen Nachteil dar, wenn ein größerer Teil der Pflanze in die Messung einbezogen wird. Ein Vorteil des Sub-THz-Bereichs für diese Art von Messungen besteht darin, dass für diesen Frequenzbereich Strahlungsquellen mit wesentlich höheren Ausgangsleistungen zur Verfügung stehen als sich im THz-Bereich mit üblichen Techniken erreichen lassen, was die Erfassung eines größeren Teils einer Pflanze bei der Messung erleichtert. Zudem sind technische Lösungen im Sub-THz--Frequenzbereich tendenziell preisgünstiger zu realisieren als im THz-Frequenzbereich.

Im Folgenden wird ein Versuchsaufbau vorgestellt, in welchem die Transmission von Mikrowellenstrahlung bei einer Frequenz von 35 GHz für die Messung des Wassergehalts von Pflanzen verwendet wird. Dabei wird auch der Anteil der Strahlung berücksichtigt, der nicht genau geradeaus transmittiert wird, sondern durch Streuung oder Beugung an der Pflanze in andere Richtungen abgelenkt wird. Anschließend wird die Tauglichkeit dieser Messanordnung anhand einer Messreihe mit Gerstenpflanzen evaluiert.

4.1. Versuchsaufbau und Messungen

Das Grundprinzip der Messungen basiert auch hier auf der Korrelation zwischen der Absorption der Strahlung in der Pflanze und deren Wassergehalt. Bei den Messungen in Kapitel 3 konnte allerdings stets darauf geachtet werden, dass die Oberflächen des durchstrahlten Blattes senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der THz-Strahlung orientiert sind, um eine definierte Geometrie der Messung herzustellen. Wenn eine ganze Pflanze in den Strahlengang eingebracht wird, ist dies nicht mehr möglich, sondern die mehr oder weniger zufällige Ausrichtung und Form der Blätter müssen als gegeben hingenommen werden. Durch Streuung oder Beugung an den Blättern und anderen Bestandteilen der Pflanze kann es dazu kommen, dass ein Teil der Strahlung nicht geradeaus durch die Pflanze transmittiert wird, sondern in andere Richtungen abgelenkt wird. Dieser Teil der Strahlung würde also fälschlicherweise als absorbiert angenommen, falls die durchstrahlte Pflanze mit einem Detektor betrachtet wird, der nur den genau geradeaus transmittierten Anteil erfasst. Aus

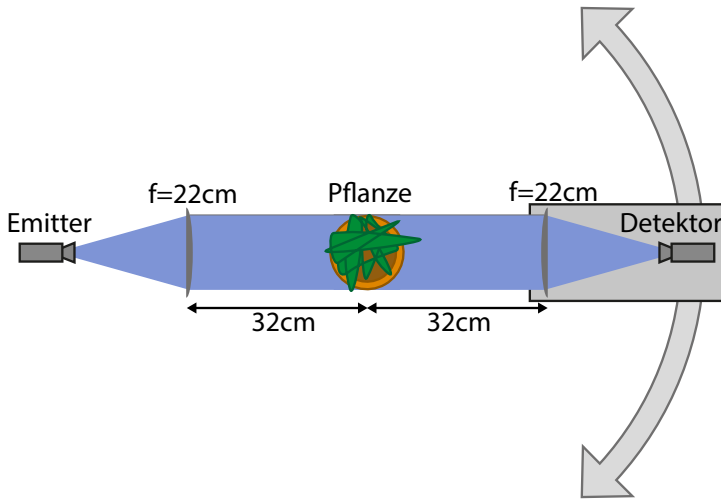


Abbildung 4.1.: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus. Der Emitter bleibt an einer festen Position, während der Detektor um die Pflanze herumbewegt wird. (vgl. Abb. 1 in [28])

diesem Grund wird in dem hier verwendeten Versuchsaufbau der Detektor auf einer Kreisbahn um die Pflanze herumbewegt. Auf diese Weise kann zumindest in einer waagerechten Ebene auch der Anteil der Strahlung erfasst werden, der in andere Richtungen abgelenkt wird.

Für die Erzeugung der Mikrowellenstrahlung bei 35 GHz kommt ein Gunn-Oszillator zum Einsatz. Die Strahlung verlässt die Horn-Antenne des Emitters in divergenter Form und wird anschließend durch eine HDPE-Linse mit einem Durchmesser von 19,5 cm und einer Brennweite von 22 cm zu einem kollimierten Strahl gebündelt, welcher an der Position der Pflanze eine Halbwertsbreite von 3,4 cm besitzt. In symmetrischer Weise wird auf der Seite des Detektors der Strahl durch eine HDPE-Linse derselben Abmessungen wie auf der Emittersseite wieder fokussiert und durch eine Hornantenne einem Zero-Bias-Schottky-Detektor zugeleitet. Der Emitter und die Kollimationslinse sind an einer konstanten Position montiert. Der Detektor hingegen ist zusammen mit der Fokussierlinse auf dem Arm eines Goniometers montiert. Im Mittelpunkt des Goniometers befindet sich eine Plattform, auf der ein Topf mit

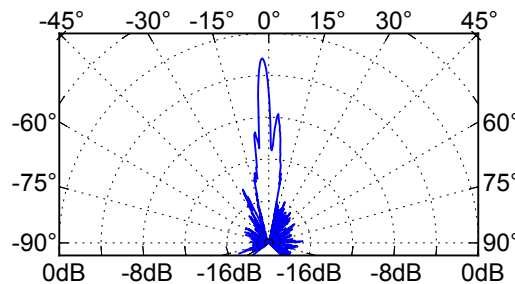


Abbildung 4.2.: Beispiel für das durch eine Gerstenpflanze transmittierte und gestreute Signal. Der größte Teil des Signals wird in gerader Linie durch die Pflanze transmittiert. Jedoch ist auch sichtbar, dass der nicht genau geradeaus transmittierte Anteil nicht vernachlässigt werden sollte. (vgl. Abb. 2 in [28])

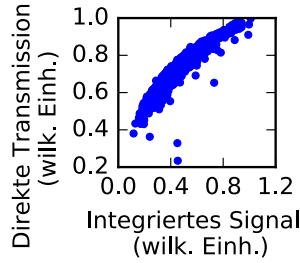


Abbildung 4.3.: Vergleich zwischen direkter Transmission und dem über dem Winkelbereich aufintegrierten Signal. Es ist zu erkennen, dass der Zusammenhang zwischen der geradeaus transmittierten Intensität und dem aufintegrierten Signal nicht linear ist. (vgl. Abb. 2 in [28])

einer Pflanze platziert werden kann. Der Detektor kann so in einem Winkelbereich von 270° um die Pflanze herumbewegt werden. Ein Beispiel für eine solche Messung ist in Abb. 4.2 dargestellt. Das dabei aufgenommene Signal wird aufintegriert, um ein Maß für die Summe aus transmittierter und gestreuter Strahlung zu erhalten. Um Schwankungen des vom Messaufbau ausgegebenen Signalpegels, die insbesondere durch eine Temperaturabhängigkeit der verwendeten Mikrowellenkomponenten entstehen könnten, auszugleichen, wird zusätzlich zu jeder Messung mit einer Pflanze auch eine Messung mit dem leeren Versuchsaufbau durchgeführt, um dessen aktuellen Zustand zu charakterisieren. Zur weiteren Auswertung wird das Ergebnis der Messung mit der Pflanze zum Ergebnis der leeren Referenzmessung ins Verhältnis gesetzt.

In Abb. 4.3 ist für alle durchgeführten Messungen der Zusammenhang zwischen der auf direktem Weg geradlinig transmittierten Signalamplitude und dem über den Winkelbereich aufintegrierten Signal dargestellt. Es zeigt sich, dass der Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen nicht linear ist. Der Mehraufwand der winkelaufgelösten Messung ist also gerechtfertigt, da durch eine einfache Transmissionsmessung nicht dieselbe Information zu erhalten wäre.

Für die Messungen wurden in insgesamt 22 Töpfen bei guter Bewässerung Gerstpflanzen herangezogen. Ab dem Beginn der Messungen wurden elf Töpfe nicht mehr bewässert, während die anderen elf Töpfe wie gehabt weiterhin mit Wasser versorgt wurden. Mit allen Töpfen wurde mindestens alle zwei Tage¹ jeweils eine Messung durchgeführt. Die Messungen wurden so lange fortgesetzt, bis die Vertrocknung der nicht bewässerten Pflanzen deutlich sichtbar wurde.

4.2. Auswertung und Ergebnisse

Wenn die aufintegrierte Signalintensität der Referenzmessung mit I_0 bezeichnet wird und der Wert der Messung mit der Pflanze mit I , dann lässt sich die Abschwächung der Strahlung durch die Pflanze ausdrücken als:

$$A = -\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (4.1)$$

¹Ausnahme: Zwischen den Messungen an Tag 26 und Tag 29 lag ein Abstand von drei Tagen.

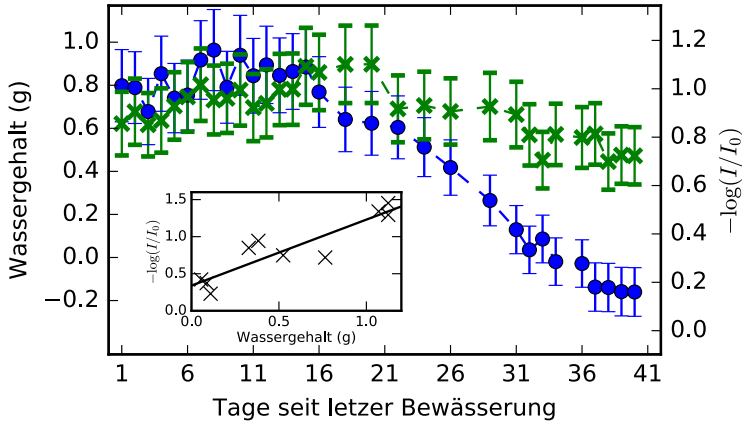


Abbildung 4.4.: Der absolute Wassergehalt des untersuchten Ausschnitts der Pflanzen wurde aus dessen linearer Korrelation zur Absorption bestimmt. Die Trockenstressgruppe (blaue Kreise) und die Kontrollgruppe (grüne Kreuze) können klar voneinander unterschieden werden. Für sehr kleine Werte des Wassergehalts resultiert diese Methode allerdings in unglaublichen Ergebnissen. Der kleinere Plot zeigt die Werte, die für den linearen Fit verwendet wurden. Die Fehlerbalken geben die Unsicherheit des linearen Fits wieder. (vgl. Abb. 4 in [28])

Der so erhaltene Wert beschreibt im Wesentlichen die Absorption der Strahlung in der Pflanze. Der Vollständigkeit halber sei aber angemerkt, dass auch Intensitätsverluste aus anderen Gründen als Absorption, wie beispielsweise Reflexion oder Streuung an der Blattoberfläche, sofern dadurch die Strahlung den vom Detektor erfassten Winkelbereich verlässt, in dem Ergebnis der Messung enthalten sind.

Schon nach dieser einfachen Auswertung der Messdaten wird die Austrocknung der nicht bewässerten Pflanzen deutlich sichtbar. Zu Beginn des Experiments bleiben die Messwerte der Kontrollgruppe und der Trockenstressgruppe für einige Tage auf einem sehr ähnlichen Niveau. Nach ungefähr zwei Wochen beginnen die Messwerte der Trockenstressgruppe deutlich zu sinken. Ihr Minimum erreichen die Werte in etwa am 37. Versuchstag. Währenddessen bleiben die Messwerte der Kontrollgruppe über das gesamte Experiment auf einem ähnlichen Niveau wie zu Beginn des Experiments.

Um den Wassergehalt der Pflanzen zu bestimmen, kann dessen Korrelation zur Absorption des Mikrowellensignals genutzt werden. Zur Herstellung dieses Zusammenhangs, sind gravimetrische Vergleichsmessungen nötig, die aufgrund ihrer destruktiven Funktionsweise erst durchgeführt werden können, nachdem das eigentliche Experiment beendet ist. Durch die Aufteilung in die Trockenstressgruppe und die Referenzgruppe decken die zu diesem Zeitpunkt zur Verfügung stehenden Pflanzen einen weiten Bereich an verschiedenen Werten für den Wassergehalt ab. Für die gravimetrische Bestimmung des Wassergehalts wurde aus den Pflanzen jeweils der Abschnitt, der im Strahlengang des Versuchsaufbaus lag, herausgeschnitten. Die Anpassung einer linearen Funktion ergibt einen Proportionalitätsfaktor von 0,89 g⁻¹ und einen Offset von 0,34 für den Zusammenhang zwischen Wassergehalt und Absorption. Der Offset ist so zu verstehen, dass auch bei einem Wassergehalt von Null nicht das komplette Signal transmittiert würde. Dieses Ergebnis bildet die Tatsache

ab, dass auch die festen Bestandteile der Pflanze und der Bambusstab, an den sie gebunden ist, zur Absorption der Strahlung beitragen. Dieser Anteil der Absorption bleibt natürlich auch im Fall einer komplett ausgetrockneten Pflanze bestehen. Im Vergleich zu den Messungen an einzelnen Blättern in Kapitel 3, in denen an komplett vertrockneten Blättern nahezu keine Absorption mehr feststellbar war, befindet sich hier eine wesentlich größere Menge an Pflanzenmaterial im Strahlengang. In der grafischen Darstellung dieser Ergebnisse in Abb. 4.4 bedeutet der lineare Zusammenhang zwischen Absorption und Wassergehalt lediglich eine Umskalierung der Ordinatenachse. Dabei zeigt sich, dass diese Methode zur Bestimmung des Wassergehalts zwar ein qualitativ durchaus sinnvolles Ergebnis liefert, jedoch sind die Zahlenwerte für besonders kleine Werte des Wassergehalts fragwürdig, da sie bis in den negativen Bereich hineinreichen. Dies kann sowohl durch eine ungenaue Kalibration des linearen Zusammenhangs zwischen Absorption und Wassergehalt verursacht werden, als auch durch eine ungenügende Berücksichtigung des Einflusses der festen Bestandteile der Pflanze. Die Angabe des absoluten Wassergehalts in Gramm ist außerdem neben dem Wasserstatus der Pflanze auch direkt von der Größe des untersuchten Ausschnitts der Pflanze abhängig und schränkt somit die Vergleichbarkeit verschiedener Messreihen ein.

Eine alternative Methode zur Bestimmung des Wassergehalts aus den Messdaten besteht in der Anwendung des unter 3.2 vorgestellten Modells, das die Pflanze als ein effektives Medium beschreibt, welches sich aus den drei Mischungskomponenten Wasser, Trockenmasse und Luft zusammensetzt. Das Ziel der Auswertung ist dabei nicht die Bestimmung des Wassergehalts in Gramm, sondern des Gewichts- oder Volumenanteils in Prozent. Dazu wird das Modell in einer vereinfachten Form angewendet, in der ausschließlich die Absorption der Strahlung in der Pflanze betrachtet wird. Aus der in Gleichung (3.9) beschriebenen effektiven Permittivität ϵ_L der Pflanze lässt sich deren Absorptionskoeffizient $\alpha(\epsilon_L)$ bestimmen. Da ϵ_L von den Volumenanteilen der Mischungskomponenten abhängt, kann man auch schreiben $\alpha(\epsilon_L) = \alpha(a_W, a_S, a_A)$. Unter der Annahme, dass die in Gleichung (4.1) beschriebene Abschwächung des Mikrowellensignals näherungsweise der Absorption entspricht, ergibt sich der folgende Zusammenhang:

$$-\ln\left(\frac{I}{I_0}\right) = \alpha(a_W, a_S, a_A) \cdot d \quad (4.2)$$

Die gesuchte Größe, die durch Anwendung dieser Gleichung bestimmt werden soll, ist der Volumenanteil des Wassers a_W . Allerdings sind auch die Volumenanteile a_S und a_A und die Dicke des durchstrahlten Materials d freie Parameter des Modells. Da hier nur Messdaten für eine einzelne Frequenz vorliegen, besteht nicht die Möglichkeit, so wie in unter 3.2 alle vier Parameter aus den Messdaten zu bestimmen. Stattdessen wird der Anteil der festen Pflanzenbestandteile aus dem Ergebnis der gravimetrischen Messungen geschätzt. Für diese Schätzung wird das effektiv durchstrahlte Volumen benötigt, zu dem das Volumen der festen Pflanzenbestandteile ins Verhältnis gesetzt wird, um a_S zu bestimmen. Für die effektive Dicke der durchstrahlten Pflanze wird ein geschätzter Wert von $d = 2$ cm verwendet. Bei der Bestimmung des effektiv durchstrahlten Pflanzenvolumens muss berücksichtigt werden, dass die Strahlintensität nach außen hin abnimmt. Daraus folgt für die effektive Fläche dieses zylinderförmigen Volumens unter Berücksichtigung des Zusammenhangs

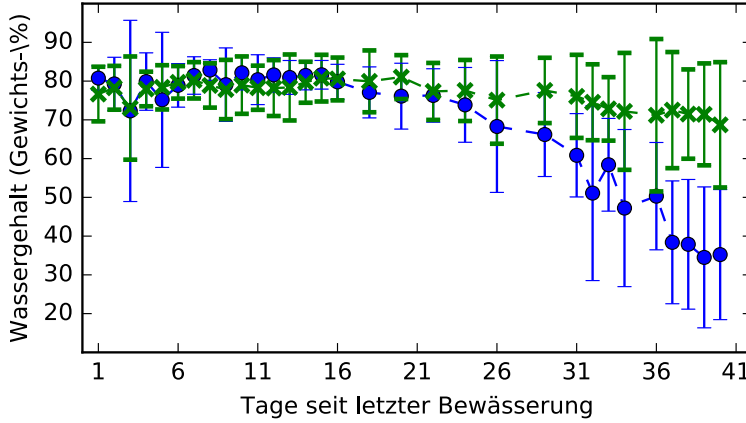


Abbildung 4.5.: Wassergehalt der Pflanzen, der durch Anwendung von Gleichung (4.2) bestimmt wurde. Die Trockenstressgruppe (blaue Kreise) und die Kontrollgruppe (grüne Kreuze) sind gut voneinander zu unterscheiden. Die Fehlerbalken geben die Standardabweichung der Messwerte der einzelnen Pflanzen wieder. (vgl. Abb. 5 in [28])

$d_{FWHM} = 2\sqrt{2 \ln 2} \sigma$ zwischen der Halbwertsbreite und der Standardabweichung des gaußförmigen Strahlprofils:

$$A_{eff} = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) r \, dr \, d\phi = 2\pi\sigma^2 = \frac{d_{FWHM}^2 \pi}{4 \ln 2}$$

Unter Zuhilfenahme des Zusammenhangs $a_W + a_S + a_A = 1$ bleibt nun a_W als einziger freier Parameter übrig. Folglich kann dieser Parameter nun durch Lösen von Gleichung (4.2) bestimmt werden. Da a_W in nicht-trivialer Weise in die Gleichung eingeht, wird zu dessen Bestimmung kein geschlossener Ausdruck gesucht, sondern die Gleichung wird numerisch gelöst. Gleichung (3.12) liefert schließlich den Gewichtsanteil des Wassers. Die so bestimmten Volumenanteile beziehen sich nicht allein auf die Biomasse der Pflanze, sondern auf das effektiv durchstrahlte Volumen, welches auch die Luft in den Zwischenräumen zwischen den Blättern umfasst. Da der Anteil der Luft, was den Gewichtsanteil betrifft, verschwindend gering ist, trifft der daraus bestimmte Gewichtsanteil des Wassers jedoch in guter Näherung auch für die Pflanze alleine zu. Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Abb. 4.5 dargestellt. Die so erhaltenen Werte für den Wassergehalt liegen in einem realistischen Bereich. Insbesondere liegen auch die Werte der vertrockneten Pflanzen weiterhin im positiven Bereich. Die Pflanzen waren am Ende des Experiments sichtbar tot und vertrocknet. Die Ergebnisse der Messungen sprechen aber dafür, dass zu diesem Zeitpunkt auch in den toten Pflanzen noch eine geringe Menge an Wasser enthalten war.

Insgesamt zeigen die Messungen, dass die hier erprobte Methode zur Anwendung der Sub-THz-Messtechnik funktioniert. Das Ziel die Austrocknung der unter Trockenstress stehenden Pflanzen mitzuverfolgen wurde erreicht. Da die Messungen ohne mechanischen Kontakt zu den Pflanzen auskommen, ist diese Methode insbesondere für Hochdurchsatzanlagen geeignet, in denen die Pflanzen automatisiert durch eine Messstation hindurch bewegt werden.

5. Fazit und Ausblick

Durch die zerstörungsfreie, nicht-invasive Messung des Blattwassergehalts können wertvolle Informationen über den Wasserhaushalt von Pflanzen gewonnen werden. Insbesondere kann dies zur Beobachtung des Wasserstatus von Pflanzen unter Trockenstress dienen. Neben der wissenschaftlichen Nutzung solcher Messungen können dadurch sowohl die Zucht als auch der Anbau von Nutzpflanzen im Hinblick auf den Wasserverbrauch und die Wasserversorgung der Pflanzen optimiert werden. Zur Durchführung derartiger Untersuchungen wird ein geeignetes Messverfahren benötigt, welches das Mitverfolgen von Änderungen des Blattwassergehalts einer Pflanze über einen Zeitraum von mehreren Tagen oder sogar Wochen ermöglicht. Etablierte Messverfahren, die für derartige Experimente bisher in Betracht kommen, sind entweder invasiv oder erlauben keinen direkten messtechnischen Zugang zum Wassergehalt des Blattes. An dieser Stelle kann die THz-Spektroskopie ihre Stärke als zerstörungsfreies Messverfahren ausspielen. Dies wurde durch umfangreiche Experimente mit verschiedenen Pflanzenarten und verschiedenen technischen Realisierungen der Messtechnik demonstriert. In Laborexperimenten, bei denen die kontinuierliche Überwachung des Wassergehalts an ausgewählten Blättern gefordert ist, sind sowohl die THz-Zeitbereichs-Spektroskopie als auch die THz-Quasi-Zeitbereichs-Spektroskopie sehr gut einsetzbar. Aufgrund ihrer vergleichsweise einfachen und preisgünstigen technischen Umsetzbarkeit ist gerade die THz-Quasi-Zeitbereichs-Spektroskopie auch für die Wasserstatusüberwachung von Pflanzen im Freien geeignet. Die Sub-THz-Messtechnik mittels derer an Stelle einzelner Blätter ein größerer Ausschnitt einer Pflanze untersucht wird, bietet sich vor allem für Hochdurchsatz-Phänotypisierungsanlagen an, in denen die Bewegung der Pflanzen durch den Messaufbau hindurch automatisiert erfolgt.

Auf Grundlage der bisher durchgeführten Arbeiten ergeben sich neue Perspektiven für weitere Experimente, sowohl im Hinblick auf den Versuchsaufbau als auch bezüglich der damit untersuchten pflanzenphysiologischen Fragestellungen. Die im Freien durchgeführten Messungen haben gezeigt, dass die Umgebungstemperatur einen erheblichen Einfluss auf den Wasserstatus der Pflanzen haben kann. Dementsprechend wäre es wünschenswert, auch im Labor die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit, der die Pflanzen ausgesetzt sind, variieren zu können. Denkbar wäre, zu diesem Zweck eine abgeschlossene Kammer zu konstruieren, welche den Versuchsaufbau mit den Pflanzen enthält, um gleichzeitig andere Laborgeräte vor zu großen Schwankungen der Temperatur und Luftfeuchtigkeit zu schützen. Um die Arbeit mit Pflanzen in verschiedener Größe zu erleichtern, würde es sich anbieten, den Laboraufbau so umzugestalten, dass zwar die Probenhalter für die Blätter wie gehabt auf einer einheitlichen Höhe stehen, aber gleichzeitig die Höhe, auf der die Töpfe der Pflanzen aufgestellt werden, für jede Pflanze variabel einstellbar ist. Dazu wäre es zweckmäßig, den bisher als Grundplatte für den Versuchsaufbau verwendeten optischen Tisch durch eine für den Versuchsaufbau angepasste neue Konstruktion

zu ersetzen. Der Ansatz, die Umgebungsbedingungen, unter denen die Pflanzen im Experiment stehen, möglichst weit der realen Umwelt im Freien nachzuempfinden, erhöht die Übertragbarkeit und die Anwendbarkeit der Ergebnisse für den Pflanzenbau. Andererseits wird dadurch aber auch die Komplexität der Experimente erhöht, was wiederum die Interpretation der Ergebnisse erschweren kann. Zum Verständnis grundlegender Zusammenhänge können deshalb auch Experimente beitragen, die nur wenige Einflussfaktoren isoliert betrachten und andere Einflüsse - soweit möglich - ausblenden. Ein Ansatz, der in diese Richtung geht, wäre der Einsatz von Aeroponik für Trockenstressexperimente. Bei dieser Anbautechnik, die ohne Erde oder ein vergleichbares Substrat auskommt, das einen Wasservorrat zwischenspeichern würde, lässt sich die Reaktion einer Pflanze auf Wassermangel unmittelbar untersuchen. Ein weiteres Themenfeld, das sich für weitere Experimente anbietet, stellt die Reaktion von Pflanzen auf zusätzliche Stressreize wie Kälte, Wärme oder Salz dar.

Auf dem Themengebiet der Wasserstatusuntersuchung mittels THz-Spektroskopie bieten sich also auch nach Abschluss dieser Dissertation noch zahlreiche Ansätze für weitergehende Untersuchungen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die in dieser Arbeit untersuchte THz- und Sub-THz-Messtechnik sich sehr gut als Methode zur Überwachung des Blattwassergehalts von Nutzpflanzen eignen. Durch die dabei entwickelten Verfahren wird eine systematische Beobachtung des Wasserhaushalts der Pflanzen ermöglicht, die ansonsten in dieser Form nicht möglich gewesen wäre.

6. Zusammenfassung

Das Grundprinzip der zerstörungsfreien, nicht-invasiven Messung des Blattwassergehalts mittels THz- und Sub-THz-Strahlung basiert auf der Tatsache, dass Strahlung in diesem Frequenzbereich durch flüssiges Wasser wesentlich stärker absorbiert wird als durch die sonstigen Bestandteile eines Blattes. Die durch das Blatt transmittierte Signalamplitude hängt also maßgeblich von dessen Wassergehalt ab. Die Messung selbst erfordert keinen mechanischen Kontakt zum Blatt, allerdings ist es zweckmäßig, das Blatt so in einem Probenhalter zu befestigen, dass es möglich wird, die Messungen reproduzierbar an derselben Stelle auf dem Blatt auszuführen.

Zur Durchführung von Langzeit-Messreihen mit verschiedenen Nutzpflanzen wurde ein Laboraufbau realisiert, der Experimente mit einer großen Anzahl von Pflanzen zur gleichen Zeit ermöglicht. In diesem Versuchsaufbau kommt ein fasergekoppeltes THz-Zeitbereichsspektrometer zum Einsatz, dessen Emitter und Detektor zusammen mit den THz-Optiken in Form eines kompakten Messkopfes am Arm eines Goniometers montiert sind. Die untersuchten Pflanzen sind in einer kreisförmigen Anordnung aufgestellt, so dass diese durch einen automatisierten Bewegungsablauf des motorisierten Goniometerarms erreicht werden können. Mit diesem Versuchsaufbau wurden Messungen mit verschiedenen Nutzpflanzen durchgeführt. Dadurch, dass die Messungen kontinuierlich und verglichen mit einer manuellen Ausführung in kurzen Zeitabständen von ungefähr einer Stunde an jeder Pflanze ausgeführt werden, können Änderungen des Blattwassergehalts detailliert mitverfolgt werden, so dass z.B. Unterschiede zwischen Tag und Nacht sichtbar werden. Durch die gleichzeitige Erfassung des Gewichts der Töpfe mit den Pflanzen kann ein Bezug zwischen der Wasserversorgung der Pflanzen und deren Blattwassergehalt hergestellt werden. Im Vergleich zwischen Roggen und Hafer lässt sich so ein signifikanter Unterschied feststellen, was die Mindestmenge der Wasserversorgung betrifft, deren Unterschreiten zum Austrocknen der Pflanzen führt, was sich in einem Anstieg der Amplitude des durch das Blatt transmittierten THz-Signals zeigt. Wenn eine Pflanze nach dem Aussetzen der Bewässerung wiederbewässert wird, zeigt sich, ob das untersuchte Blatt sich vom Trockenstress, dem es ausgesetzt war, wieder erholen kann. Sofern dies der Fall ist, fallen die unter Trockenstress angestiegenen THz-Messwerte wieder auf ihr ursprüngliches Niveau, auf dem sie sich vor dem Austrocknen des Blattes befanden. Wenn das Blatt sich nicht mehr erholen kann, trocknet es trotz Wiederbewässerung weiter aus, was sich in einem Anstieg der Messwerte bis hin zu einer fast vollständigen Transmission des THz-Signals durch das trockene Blatt zeigt. Es konnte nachgewiesen werden, dass ein Zusammenhang besteht zwischen dem durch die THz-Messungen festgestellten Wassergehalt eines Blattes zum Zeitpunkt der Wiederbewässerung und seiner Fähigkeit, sich nach der Wiederbewässerung zu erholen. Im Fall von Maispflanzen lassen sich die in dieser Hinsicht gemachten Beobachtungen in drei nach dem Grad der Austrocknung der Blätter gestaffelte Gruppen einteilen, die dadurch gekennzeichnet sind, ob die Blätter sich vollständig, nur kurzzeitig oder

gar nicht erholen. Ähnliche Beobachtungen lassen sich auch bei Sojapflanzen machen, wobei aber nur entweder vollständige oder keine Erholung beobachtet wurde. Es lässt sich so für die Messwerte eine Schwelle finden, bis zu der eine vollständige Erholung des Blattes sehr wahrscheinlich ist und nach deren Überschreiten unwahrscheinlich wird. Bei Messungen an Sojapflanzen wurden zudem parallel Messungen mit einem Photosynthese-Messsystem durchgeführt, deren Ergebnisse in sinnvoller Übereinstimmung mit den THz-Messungen sind.

Zur Bestimmung des Blattwassergehalts als Volumen- oder Gewichtsanteil kann ein Modell verwendet werden, welches das Blatt als effektives Medium beschreibt, das sich aus einer Mischung aus Wasser, Trockenmasse und Luft zusammensetzt. Durch Anpassung des Modells an das Ergebnis der THz-Messungen im Frequenzbereich können die Anteile der einzelnen Bestandteile an dieser Mischung bestimmt werden. Der Vergleich mit parallel ausgeführten gravimetrischen Messungen zeigt, dass man auf diese Weise realistische Messwerte erhält.

Eine weitere Einsatzmöglichkeit der THz-Zeitbereichsspektroskopie im Bereich der Nutzpflanzen stellt die Qualitätskontrolle von Saatgut dar. Am Beispiel von Zuckerrüben-Samen wurde gezeigt, dass sich mittels THz-Messungen mit hoher Zuverlässigkeit bestimmen lässt, ob die Samen einen für ihre Keimfähigkeit notwendigen Embryo enthalten oder nicht.

Eine Möglichkeit, die Kosten und die Komplexität eines THz-Spektrometers zu reduzieren, stellt die THz-Quasi-Zeitbereichsspektroskopie dar, die an Stelle eines modengekoppelten Kurzpulslasers eine einfache Multimode-Laserdiode verwendet. Mit einem solchen THz-Quasi-Zeitbereichsspektrometer wurden Messungen an Pflanzen ausgeführt, die in guter Übereinstimmung mit den Messreihen mit dem fasergekoppelten THz-Zeitbereichsspektrometer sind. Zudem wurde das THz-Quasi-Zeitbereichsspektrometer zu einem kompakten, vergleichsweise einfach zu transportierenden Messsystem weiterentwickelt, das im Freien verwendet werden kann.

In dem Fall, dass nicht ein einzelnes Blatt untersucht werden soll, sondern ein größerer Teil einer Pflanze, kann dies durch die Verwendung etwas größerer Wellenlängen im Sub-THz-Frequenzbereich realisiert werden. Bei Messungen bei einer Frequenz von 35 GHz mit einer Gruppe von unter Trockenstress stehenden Gerstpflanzen und einer regelmäßig bewässerten Kontrollgruppe war die Austrocknung der Pflanzen unter Trockenstress in den Messungen deutlich feststellbar und die beiden Gruppen waren klar voneinander zu unterscheiden. Durch die Konzeption des Versuchsaufbaus wird zudem auch an den Pflanzen gestreute Strahlung mit erfasst. Aus den Ergebnissen der Messungen kann man den Wassergehalt der Pflanzen sowohl als absolute Menge in Gramm als auch als prozentualen Gewichtsanteil errechnen.

Die durchgeführten Arbeiten zeigen also, dass je nach angestrebtem Einsatzzweck verschiedene auf THz- und Sub-THz-Strahlung basierende Verfahren zur Bestimmung des Wasserstatus von Nutzpflanzen zur Verfügung stehen.

Summary

The basic principle of the non-destructive and non-invasive measurement of a plant's leaf water content by the means of THz and sub-THz radiation is based on the high contrast in absorption between liquid water and the leaves' other components in this frequency range. Thus the amplitude of the signal that is transmitted through the leaf is strongly correlated to its water content. While the measurement itself is contactless, it can be convenient to fix the leaf in a sample holder that keeps the leaf in a defined position.

To conduct long-term measurements on agricultural crop plants a laboratory setup was constructed which can be used for experiments with several plants at the same time. In this setup a fiber-coupled THz time domain spectrometer is used with the THz emitter and detector and the THz optics integrated as a compact measurement head which is mounted on the motorized arm of a goniometer. The plants under examination are placed in a circular arrangement so that they can be reached by the automated movement of the measurement head. Using this setup measurements on several different crops were performed. In contrast to hand-operated experiments a continuous and comparably high rate of one measurement per plant per hour is achieved. Thus, a detailed view on changes in leaf water content is possible, revealing for example changes between day and night. By logging the weight of the plants' pots during the experiment the leaf water content can be seen in conjunction with the plants' water supply. The comparison between rye and oat shows a significant difference regarding the minimum amount of water needed by the plants before they start to dry out resulting in an increase of the transmitted THz signal. When such a stressed plant is rewatered, it may or may not recover. If it does, the amplitude of the THz signal will return back to its initial level. If the leaf is not able to recover any more, it will dry out despite of the irrigation until nearly the complete THz signal is transmitted through it. The experiments show that a correlation exists between the water content that is determined by the THz measurements at the moment of rewatering and the ability of the leaf to recover. In the case of corn the observations made during the experiments in this regard can be divided into three groups. Depending on how far the drought of the leaves has proceeded they are either able to recover completely, only temporarily or not at all. Similar observations are made with soy plants. However, these are only found to either recover completely or not at all. Therefore, a threshold can be found that decides whether the recovery of the leaf after rewatering will be likely or not.

For determining the leaf water content as a volumetric or gravimetric fraction, a model based on an effective medium theory can be used describing the leaf as a mixture of water, solid material and air. By fitting this model to the measured THz spectra the fractions of these three components can be determined. The comparison to gravimetric measurements which were conducted in parallel shows that this method leads to realistic results.

Another application of THz spectroscopy in the field of agriculture is the quality control of seeds. Measurements with sugar beet seeds in a THz time domain spectrometer were performed and based on the results of these measurements a good prediction rate of whether a seed contains an embryo that is needed for the seed to sprout or not is achieved.

A great reduction of the overall costs and complexity of a THz time domain spectrometer can be achieved, when the modelocked fs-laser is replaced by a simple multimode laser diode. Measurements on plants under drought stress which were conducted with such a THz quasi time domain setup are in good agreement with the measurements with the fiber-coupled THz time domain setup. Additionally, based on the THz quasi time domain spectrometer a comparably compact and portable setup that can be used in the field was built.

In order to perform measurements not only on one leaf but on a larger part of a plant longer wavelengths in the sub-THz frequency range can be used. In a measurement series at a frequency of 35 GHz barley plants under drought stress were compared to a well-irrigated control group. Both groups could be clearly distinguished in the results of the measurements. The measurement setup is constructed in a way that captures not only the radiation that is transmitted through the plant but also the parts which are scattered on the plant's surface. From the measured values the water content of the plants can be calculated as the absolute amount of water in grams as well as the gravimetric fraction in percent.

To sum up, the different experiments that are described above show that, depending on the intended use, several different possibilities exist how radiation in the THz and sub-THz frequency range can be used for water status measurements on agricultural crop plants.

7. Eigene Veröffentlichungen

Beiträge in Fachzeitschriften

2016

- Ralf Gente, Stefan Busch, Eva-Maria Stübling, Lorenz Maximilian Schneider, Christian B. Hirschmann, Jan C. Balzer, and Martin Koch. Quality control of sugar beet seeds with THz time-domain spectroscopy. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 2016 (online first)

2015

- Ralf Gente and Martin Koch. Monitoring leaf water content with THz and sub-THz waves. *Plant Methods*, 11(1):1–9, 2015
- Ralf Gente, Arno Rehn, and Martin Koch. Contactless water status measurements on plants at 35 GHz. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 36(3):312–317, 2015
- Norman Born, Ralf Gente, Ibraheem AI Al-Naib, and Martin Koch. Laser beam machined free-standing terahertz metamaterials. *Electronics Letters*, 51(13):1012–1014, 2015

2013

- Ralf Gente, Norman Born, Nino Voß, Wiebke Sannemann, Jens Léon, Martin Koch, and Enrique Castro-Camus. Determination of leaf water content from terahertz time-domain spectroscopic data. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 34(3-4):316–323, 2013
- Bernd M. Fischer, Steffen Wietzke, Marco Reuter, Ole Peters, Ralf Gente, Christian Jansen, Nico Vieweg, and Martin Koch. Investigating material characteristics and morphology of polymers using terahertz technologies. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 3(3):259–268, 2013

2012

- Ralf Gente, Christian Jansen, Robert Geise, Ole Peters, Michael Gente, Norman Krumbholz, Christoph Möller, Stefan Busch, and Martin Koch. Scaled bistatic radar cross section measurements of aircraft with a fiber-coupled THz time-domain spectrometer. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 2(4):424–431, 2012

Buchkapitel

2015

- Enrique Castro-Camus, Karin Wiesauer, Ralf Gente, and Martin Koch. *Handbook of Terahertz Technologies: Devices and Applications*, chapter Industrial Applications of Terahertz Waves, pages 451–494. Pan Stanford, 2015

Konferenzbeiträge

2016

- Ralf Gente, Norman Born, Jan C. Balzer, and Martin Koch. Assessment of plants' reaction to drought stress using THz time domain spectroscopy. In *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2016 41th International Conference on*, Copenhagen, Denmark, 2016
- Ralf Gente, Jan C. Balzer, and Martin Koch. Water status monitoring of plants using THz systems. In *THz Workshop 2016*, Erice, Italy, 2016

2015

- Ralf Gente, Norman Born, Arno Rehn, Jan C. Balzer, and Martin Koch. Leaf water dynamics monitored by THz and sub-THz waves. In *PhenoDays*, Munich, Germany, 2015
- Ralf Gente, Norman Born, Ajanth Velauthapillai, Jan C. Balzer, and Martin Koch. Monitoring the water content of plant leaves with THz time domain spectroscopy. In *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2015 40th International Conference on*, Hong Kong, 2015
- Ralf Gente, Norman Born, and Martin Koch. Terahertz sensing in plant science. In *European Microwave Week*, Paris, France, 2015
- Ralf Gente, Norman Born, Arno Rehn, Jan C. Balzer, and Martin Koch. Leaf water dynamics monitored by THz und sub-THz waves. In *German THz Conference*, Dresden, Germany, 2015

2014

- Ralf Gente, Norman Born, Michael Schwerdtfeger, Arno Rehn, and Martin Koch. Methods for water status detection with THz waves. In *4th EOS Topical Meeting on Terahertz Science & Technology (TST 2014)*, Camogli, Italy, 2014
- Norman Born, Ralf Gente, David Behringer, Michael Schwerdtfeger, Stefan Busch, Sascha Liepelt, Birgit Ziegenhagen, and Martin Koch. Monitoring the water status of plants using THz radiation. In *Infrared, Millimeter, and Terahertz waves (IRMMW-THz), 2014 39th International Conference on*, Tucson, AZ, USA , 2014

- Francesco D’Angelo, Mischa Bonn, Ralf Gente, Martin Koch, and Dmitry Turchinovich. Ultra-broadband THz time-domain spectroscopy of common polymers with THz air-photonics. In *CLEO: Science and Innovations*, pages SF1F–2. Optical Society of America, 2014
- Ralf Gente, Norman Born, and Martin Koch. Water status monitoring of plants using THz systems. In *2nd Annual Conference of COST Action MP1204 & International Conference on Semiconductor Mid-IR Materials and Optics SM-MO2014*, Marburg, Germany, 2014
- Ralf Gente, Norman Born, Arno Rehn, and Martin Koch. THz and sub-THz waves for water status detection. In *CROP.SENSE.net Symposium*, Bonn, Germany, 2014

2013

- Ralf Gente, Norman Born, Nino Voß, Wiebke Sannemann, Jens Léon, Martin Koch, and Enrique Castro-Camus. Water status in plants monitored by THz time-domain spectroscopy. In *Optical Sensors*, pages SM3B–5. Optical Society of America, 2013
- Ralf Gente, Norman Born, Michael Schwerdtfeger, Stefan Busch, Thorsten Probst, Gunter Urbasch, Kirstin Baum, and Martin Koch. Terahertz radiation for in vivo determination of plant water status. In *International THz Conference*, Villach, Österreich, 2013

2012

- Ralf Gente, Wiebke Sannemann, Agim Ballvora, Nino Voß, Konstantin Hobuß, Arno Rehn, Michael Schwerdtfeger, Stefan Busch, Kristian Altmann, Merle Noschinski, Jens Léon, and Martin Koch. Determination of plant water status with THz and sub-THz waves. In *International Workshop and Meeting of the German Society of Plant Nutrition*, Bonn, Germany, 2012
- Ralf Gente, Benedikt Scherger, and Martin Koch. Density effects on dielectric properties of polymers and ceramics in the THz regime. In *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2012 37th International Conference on*, Wollongong, Australia, 2012
- Ralf Gente, Christian Jansen, Robert Geise, Ole Peters, Michael Gente, Norman Krumbholz, Christoph Möller, Stefan Busch, and Martin Koch. Scaled bi-static radar cross section measurements with a fiber-coupled THz time domain spectrometer. In *Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2012 37th International Conference on*, Wollongong, Australia, 2012

Patentanmeldungen

- Stefan Busch, Thorsten Probst, Ralf Gente,
Verfahren, Optik, Messeinrichtung und Messsystem für die orts aufgelöste
Terahertz-Zeitbereichsspektroskopie,
Europäische Patentanmeldung EP 14 15 6712, Europäisches Patentamt, 2014
- Eva-Maria Stübling, Stefan Busch, Ralf Gente, Thorsten Probst
Verfahren und Vorrichtung für die THz-Zeitbereichsspektroskopie
Europäische Patentanmeldung EP 15 00 2578, Europäisches Patentamt, 2015

Die Seite 137 (Wissenschaftlicher Werdegang) enthält persönliche Daten.
Sie ist deshalb nicht Bestandteil der Online-Veröffentlichung.

Literaturverzeichnis

- [1] C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, and L. L. White, editors. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, chapter Summary for policymakers, pages 1–32. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
- [2] Robert T. Furbank and Mark Tester. Phenomics - technologies to relieve the phenotyping bottleneck. *Trends in Plant Science*, 16(12):635–644, 2011.
- [3] Hans J. Liebe, George A. Hufford, and Takeshi Manabe. A model for the complex permittivity of water at frequencies below 1 THz. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 12(7):659–675, 1991.
- [4] Cecilie Rønne and Søren Rud Keiding. Low frequency spectroscopy of liquid water using THz-time domain spectroscopy. *Journal of Molecular Liquids*, 101(1-3):199–218, 2002.
- [5] Priyamvada Tewari, Zachary D. Taylor, David Bennett, Rahul S. Singh, Martin O. Culjat, Colin P. Kealey, Jean Pierre Hubschman, Shane White, Alistair Cochran, Elliott R. Brown, et al. Terahertz imaging of biological tissues. *Studies in health technology and informatics*, 163:653–657, 2010.
- [6] Sillas Hadjiloucas, Gillian Claire Walker, John Wesley Bowen, and Apostolos Zafiropoulos. Propagation of errors from a null balance terahertz reflectometer to a sample’s relative water content. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 178, page 012012. IOP Publishing, 2009.
- [7] B. B. Hu and M. C. Nuss. Imaging with terahertz waves. *Opt. Lett.*, 20(16):1716–1718, Aug 1995.
- [8] D. M.M. Mittleman, R. H. Jacobsen, and M. C. Nuss. T-ray imaging. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2(3):679–692, 1996.
- [9] J.-C. Iriarte, D. Etayo, I. Palacios, I. Maestrojuan, I. Liberal, A. Rebollo, J. Teniente, I. Ederra, and R. Gonzalo. Water content evolution in leaves based on active THz imaging system. In *Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on*, pages 1049–1050, 2011.
- [10] Martin Koch. THz imaging: fundamentals and biological applications. In *Proc. SPIE 3828, Terahertz Spectroscopy and Applications II*, volume 3828, pages 202–208, 1999.

- [11] Hong Bing Zhang, Kazutaka Mitobe, and Noboru Yoshimura. Application of terahertz imaging to water content measurement. *Japanese Journal of Applied Physics*, 47(10):8065–8070, 2008.
- [12] Björn Breitenstein, Maik Scheller, Mohammad Khaled Shakfa, Thomas Kinder, Thomas Müller-Wirts, Martin Koch, and Dirk Selmar. Introducing terahertz technology into plant biology: A novel method to monitor changes in leaf water status. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 84(2):158–161, 2012.
- [13] Thomas Kinder, Thomas Müller-Wirts, Björn Breitenstein, Dirk Selmar, Michael Schwerdtfeger, Maik Scheller, Ole Peters, and Martin Koch. In-vivo-Messung des Blattwassergehalts mit Terahertz-Strahlung. *BioPhotonik*, 1:40–42, 2012.
- [14] S. Hadjiloucas, L. S. Karatzas, and J. W. Bowen. Measurements of leaf water content using terahertz radiation. *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, 47(2):142–149, 1999.
- [15] Sillas Hadjiloucas, Roberto K. H. Galvão, and John W. Bowen. Analysis of spectroscopic measurements of leaf water content at terahertz frequencies using linear transforms. *J. Opt. Soc. Am. A*, 19(12):2495–2509, Dec 2002.
- [16] C. Jördens, M. Scheller, B. Breitenstein, D. Selmar, and M. Koch. Evaluation of leaf water status by means of permittivity at terahertz frequencies. *Journal of Biological Physics*, 35(3):255–264, 2009.
- [17] M. Scheller, C. Jördens, B. Breitenstein, D. Selmar, and M. Koch. Effective permittivity and scattering model for the evaluation of the leaf water status. In *Infrared, Millimeter and Terahertz Waves, 2008. IRMMW-THz 2008. 33rd International Conference on*, pages 1–2, 2008.
- [18] Ralf Gente, Norman Born, Nino Voß, Wiebke Sannemann, Jens Léon, Martin Koch, and Enrique Castro-Camus. Determination of leaf water content from terahertz time-domain spectroscopic data. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 34(3-4):316–323, 2013.
- [19] E. Castro-Camus, M. Palomar, and A. A. Covarrubias. Leaf water dynamics of arabidopsis thaliana monitored in-vivo using terahertz time-domain spectroscopy. *Scientific reports*, 3:1–5, 2013.
- [20] Norman Born, David Behringer, Sascha Liepelt, Sarah Beyer, Michael Schwerdtfeger, Birgit Ziegenhagen, and Martin Koch. Monitoring plant drought stress response using terahertz time-domain spectroscopy. *Plant Physiology*, 164(4):1571–1577, 2013.
- [21] Ralf Gente and Martin Koch. Monitoring leaf water content with THz and sub-THz waves. *Plant Methods*, 11(1):1–9, 2015.
- [22] F. T. Ulaby and R. P. Jedlicka. Microwave dielectric properties of plant materials. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on*, GE-22(4):406–415, 1984.

- [23] F. T. Ulaby, C. T. Allen, G. Eger, and E. Kanemasu. Relating the microwave backscattering coefficient to leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 14(1-3):113–133, 1984.
- [24] Simonetta Paloscia and Paolo Pampaloni. Microwave vegetation indexes for detecting biomass and water conditions of agricultural crops. *Remote Sensing of Environment*, 40(1):15 – 26, 1992.
- [25] Simonetta Paloscia and Paolo Pampaloni. Microwave remote sensing of plant water stress. *Remote Sensing of Environment*, 16(3):249 – 255, 1984.
- [26] W. Bouten, P. J. F. Swart, and E. De Water. Microwave transmission, a new tool in forest hydrological research. *Journal of Hydrology*, 124(1-2):119–130, 1991.
- [27] M. S. Moran, A. Vidal, D. Troufleau, J. Qi, T. R. Clarke, P. J. Pinter, T. A. Mitchell, Y. Inoue, and C. M. U. Neale. Combining multifrequency microwave and optical data for crop management. *Remote Sensing of Environment*, 61(1):96–109, 1997.
- [28] Ralf Gente, Arno Rehn, and Martin Koch. Contactless water status measurements on plants at 35 GHz. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 36(3):312–317, 2015.
- [29] Hans-Walter Heldt and Birgit Piechulla. *Pflanzenbiochemie*. Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [30] E. Strasburger, J. W. Kadereit, C. Körner, B. Kost, and U. Sonnewald. *Strasburger - Lehrbuch der Pflanzenwissenschaften*. Springer Berlin Heidelberg, 2014.
- [31] Peter Schopfer and Axel Brennicke. *Pflanzenphysiologie*. Spektrum Akademischer Verlag, 2010.
- [32] H. Bannwarth, B. P. Kremer, and A. Schulz. *Basiswissen Physik, Chemie und Biochemie: Vom Atom bis zur Atmung - für Biologen, Mediziner und Pharmazeuten*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [33] Sergi Munné-Bosch and Leonor Alegre. Die and let live: leaf senescence contributes to plant survival under drought stress. *Functional Plant Biology*, 31(3):203–216, 2004.
- [34] Hamlyn G. Jones. Monitoring plant and soil water status: established and novel methods revisited and their relevance to studies of drought tolerance. *Journal of experimental botany*, 58(2):119–130, 2007.
- [35] H. D. Barrs and P. E. Weatherley. A re-examination of the relative turgidity technique for estimating water deficits in leaves. *Australian Journal of Biological Sciences*, 15(3):413–428, 1962.
- [36] P. E. Weatherley. Studies in the water relations of the cotton plant. *New Phytologist*, 49(1):81–97, 1950.

- [37] Eric C. Campbell, Gaylon S. Campbell, and Wayne K. Barlow. A dewpoint hygrometer for water potential measurement. *Agricultural Meteorology*, 12:113–121, 1973.
- [38] Hanno Richter. Water relations of single drying leaves: evaluation with a dewpoint hygrometer. *Journal of Experimental Botany*, 29(1):277–280, 1978.
- [39] Michael J. Savage, Herman H. Wiebe, and Alfred Cass. In situ field measurement of leaf water potential using thermocouple psychrometers. *Plant Physiology*, 73(3):609–613, 1983.
- [40] Brian J. Andraski and Bridget R. Scanlon. *Methods of Soil Analysis: Part 4 Physical Methods*, chapter Thermocouple Psychrometry, pages 609–642. Soil Science Society of America, 2002.
- [41] Decagon Devices, Inc. *WP4C Dewpoint Potentia Meter Operator’s Manual, Version 2*. Decagon Devices, Inc., Pullman, WA., 2007.
- [42] M. A. Dixon and M. T. Tyree. A new stem hygrometer, corrected for temperature gradients and calibrated against the pressure bomb. *Plant, Cell & Environment*, 7(9):693–697, 1984.
- [43] M. F. Beardsell, P. G. Jarvis, and B. Davidson. A null-balance diffusion porometer suitable for use with leaves of many shapes. *Journal of Applied Ecology*, 9(3):677–690, 1972.
- [44] J. L. Monteith, G. S. Campbell, and E. A. Potter. Theory and performance of a dynamic diffusion porometer. *Agricultural and forest meteorology*, 44(1):27–38, 1988.
- [45] Patrice A. Morrow and R. O. Slatyer. Leaf resistance measurements with diffusion porometers: precautions in calibration and use. *Agricultural Meteorology*, 8:223–233, 1971.
- [46] Robert W. Pearcy, E.-Detlef Schulze, and Reiner Zimmermann. *Plant Physiological Ecology: Field methods and instrumentation*, chapter Measurement of transpiration and leaf conductance, pages 137–160. Springer Netherlands, Dordrecht, 2000.
- [47] Ellis F. Wallihan. Modification and use of an electric hygrometer for estimating relative stomatal apertures. *Plant physiology*, 39(1):86, 1964.
- [48] E.-D. Schulze, A. E. Hall, O. L. Lange, and H. Walz. A portable steady-state porometer for measuring the carbon dioxide and water vapour exchanges of leaves under natural conditions. *Oecologia*, 53(2):141–145, 1982.
- [49] Compton J. Tucker. Remote sensing of leaf water content in the near infrared. *Remote Sensing of Environment*, 10(1):23 – 32, 1980.
- [50] E. Raymond Hunt Jr. and Barrett N. Rock. Detection of changes in leaf water content using near-and middle-infrared reflectances. *Remote sensing of environment*, 30(1):43–54, 1989.

- [51] Raymond Hunt Jr., Barrett N. Rock, Park S. Nobel, et al. Measurement of leaf relative water content by infrared reflectance. *Remote sensing of environment*, 22(3):429–435, 1987.
- [52] Compton J. Tucker, Brent N. Holben, James H. Elgin, and James E. McMurtrey. Remote sensing of total dry-matter accumulation in winter wheat. *Remote Sensing of Environment*, 11:171–189, 1981.
- [53] Compton J. Tucker. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2):127–150, 1979.
- [54] David P. Roy, M. A. Wulder, T. R. Loveland, C. E. Woodcock, R. G. Allen, M. C. Anderson, D. Helder, J. R. Irons, D. M. Johnson, R. Kennedy, et al. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment*, 145:154–172, 2014.
- [55] John Weier and David Herring. Measuring vegetation (NDVI & EVI). *NASA online publication*, 2000.
- [56] Bo-Cai Gao. NDWI - a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote sensing of environment*, 58(3):257–266, 1996.
- [57] J. Peñuelas, J. Pinol, R. Ogaya, and I. Filella. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). *International Journal of Remote Sensing*, 18(13):2869–2875, 1997.
- [58] J. Peñuelas, I. Filella, C. Biel, L. Serrano, and R. Save. The reflectance at the 950–970 nm region as an indicator of plant water status. *International journal of remote sensing*, 14(10):1887–1905, 1993.
- [59] Kai-Erik Peiponen, Axel Zeitler, and Makoto Kuwata-Gonokami. *Terahertz Spectroscopy and Imaging*. Springer, 2012.
- [60] P. U. Jepsen, D. G. Cooke, and M. Koch. Terahertz spectroscopy and imaging - modern techniques and applications. *Laser & Photonics Reviews*, 5(1):124–166, 2011.
- [61] Matthew C. Beard, Gordon M. Turner, and Charles A. Schmuttenmaer. Terahertz spectroscopy. *The Journal of Physical Chemistry B*, 106(29):7146–7159, 2002.
- [62] D. H. Auston, K. P. Cheung, and P. R. Smith. Picosecond photoconducting hertzian dipoles. *Applied physics letters*, 45(3):284–286, 1984.
- [63] Ajay Nahata, David H. Auston, Tony F. Heinz, and Chengjiu Wu. Coherent detection of freely propagating terahertz radiation by electro-optic sampling. *Applied Physics Letters*, 68(2):150–152, 1996.
- [64] Michael C. Kemp, P. F. Taday, Bryan E. Cole, J. A. Cluff, Anthony J. Fitzgerald, and William R. Tribe. Security applications of terahertz technology. In *AeroSense 2003*, pages 44–52. International Society for Optics and Photonics, 2003.

- [65] R. Piesiewicz, C. Jansen, S. Wietzke, D. Mittleman, M. Koch, and T. Kürner. Properties of building and plastic materials in the THz range. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 28(5):363–371, 2007.
- [66] D. Grischkowsky, Søren Keiding, Martin Van Exter, and Ch. Fattinger. Far-infrared time-domain spectroscopy with terahertz beams of dielectrics and semiconductors. *JOSA B*, 7(10):2006–2015, 1990.
- [67] J. R. Birch. The far infrared optical constants of polyethylene. *Infrared Physics*, 30(2):195–197, 1990.
- [68] Albert Redo-Sanchez and Xi-Cheng Zhang. Terahertz science and technology trends. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 14(2):260–269, 2008.
- [69] Mira Naftaly and Robert E. Miles. Terahertz time-domain spectroscopy for material characterization. *Proceedings of the IEEE*, 95(8):1658, 2007.
- [70] Bernd M Fischer, Hanspeter Helm, and Peter Uhd Jepsen. Chemical recognition with broadband THz spectroscopy. *Proceedings of the IEEE*, 95(8):1592–1604, 2007.
- [71] S. Wietzke, C. Jansen, C. Jördens, N. Krumbholz, N. Vieweg, M. Scheller, M. K. Shakfa, D. Romeike, T. Hochrein, M. Mikulics, and M. Koch. Industrial applications of THz systems. In *Proc. SPIE 7385, International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2009: Terahertz and High Energy Radiation Detection Technologies and Applications*, volume 7385, pages 738506–738506–13, 2009.
- [72] C. Jördens, S. Wietzke, M. Scheller, and M. Koch. Investigation of the water absorption in polyamide and wood plastic composite by terahertz time-domain spectroscopy. *Polymer Testing*, 29(2):209–215, 2010.
- [73] M. Theuer, R. Beigang, and D. Grischkowsky. Highly sensitive terahertz measurement of layer thickness using a two-cylinder waveguide sensor. *Applied Physics Letters*, 97(7):071106, 2010.
- [74] Frank Rutz, Martin Koch, Shilpa Khare, Martin Moneke, Heike Richter, and Uwe Ewert. Terahertz quality control of polymeric products. *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 27(4):547–556, 2006.
- [75] Ole Peters, Stefan Frederik Busch, Bernd Michael Fischer, and Martin Koch. Determination of the carbon nanotube concentration and homogeneity in resin films by THz spectroscopy and imaging. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 33(12):1221–1226, 2012.
- [76] Christian Jansen, Steffen Wietzke, Ole Peters, Maik Scheller, Nico Vieweg, Mohammed Salhi, Norman Krumbholz, Christian Jördens, Thomas Hochrein, and Martin Koch. Terahertz imaging: applications and perspectives. *Applied optics*, 49(19):E48–E57, 2010.

- [77] N. Krumbholz, T. Hochrein, N. Vieweg, T. Hasek, K. Kretschmer, M. Bastian, M. Mikulics, and M. Koch. Monitoring polymeric compounding processes inline with THz time-domain spectroscopy. *Polymer Testing*, 28(1):30–35, 2009.
- [78] Steffen Wietzke, Christian Jansen, Maik Scheller, Norman Krumbholz, Ole Peters, Christian Jördens, T Hochrein, T Jung, S Chatterjee, and Martin Koch. Anwendungen für Terahertz-Systeme: Märkte und Perspektiven einer innovativen Technik. *Chemie Ingenieur Technik*, 82(4):467–476, 2010.
- [79] S. Wietzke, C. Jansen, F. Rutz, D. M. Mittleman, and M. Koch. Determination of additive content in polymeric compounds with terahertz time-domain spectroscopy. *Polymer Testing*, 26(5):614–618, 2007.
- [80] S. Wietzke, C. Jördens, N. Krumbholz, B. Baudrit, M. Bastian, and M. Koch. Terahertz imaging: a new non-destructive technique for the quality control of plastic weld joints. *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, 2, 2007.
- [81] Ole Peters, Michael Schwerdtfeger, Steffen Wietzke, Stefan Sostmann, Rainer Scheunemann, Rafal Wilk, Ronald Holzwarth, Martin Koch, and Bernd M. Fischer. Terahertz spectroscopy for rubber production testing. *Polymer Testing*, 32(5):932–936, 2013.
- [82] Yat Hei Lo and Rainer Leonhardt. Aspheric lenses for terahertz imaging. *Optics express*, 16(20):15991–15998, 2008.
- [83] Benedikt Scherger, Christian Jördens, and Martin Koch. Variable-focus terahertz lens. *Optics Express*, 19(5):4528–4535, 2011.
- [84] M. Wichmann, A. S. Mondol, N. Kocic, S. Lippert, T. Probst, M. Schwerdtfeger, S. Schumann, T. Hochrein, P. Heidemeyer, M. Bastian, et al. Terahertz plastic compound lenses. *Applied optics*, 52(18):4186–4191, 2013.
- [85] Benedikt Scherger, Steffen Wietzke, Maik Scheller, Nico Vieweg, Matthias Wichmann, Martin Koch, and Karin Wiesauer. Characterization of micropowders for the fabrication of compression molded THz lenses. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 32(7):943–951, 2011.
- [86] Benedikt Scherger, Maik Scheller, Christian Jansen, Martin Koch, and Karin Wiesauer. Terahertz lenses made by compression molding of micropowders. *Applied optics*, 50(15):2256–2262, 2011.
- [87] Matthias Wichmann, Benedikt Scherger, Steffen Schumann, Sina Lippert, Maik Scheller, Stefan F. Busch, Christian Jansen, and Martin Koch. Terahertz brewster lenses. *Optics Express*, 19(25):25151–25160, 2011.
- [88] N. Krumbholz, K. Gerlach, F. Rutz, M. Koch, R. Piesiewicz, T. Kürner, and D. Mittleman. Omnidirectional terahertz mirrors: A key element for future terahertz communication systems. *Applied Physics Letters*, 88(20):202905, 2006.

- [89] Claudia Brückner, Gunther Notni, and Andreas Tünnermann. Optimal arrangement of 90 off-axis parabolic mirrors in THz setups. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 121(1):113–119, 2010.
- [90] D. Turchinovich, A. Kammoun, P. Knobloch, T. Dobbertin, and M. Koch. Flexible all-plastic mirrors for the THz range. *Applied Physics A*, 74(2):291–293, 2002.
- [91] A. Sengupta, A. Bandyopadhyay, B. F. Bowden, J. A. Harrington, and J. F. Federici. Characterisation of olefin copolymers using terahertz spectroscopy. *Electron. Lett*, 42(25):1477–1479, 2006.
- [92] Stefan Busch, Benedikt Scherger, Maik Scheller, and Martin Koch. Optically controlled terahertz beam steering and imaging. *Optics letters*, 37(8):1391–1393, 2012.
- [93] Yasuaki Monnai, Kristian Altmann, Christian Jansen, Martin Koch, Hartmut Hillmer, and Hiroyuki Shinoda. Terahertz beam focusing based on plasmonic waveguide scattering. *Applied Physics Letters*, 101(15):151116, 2012.
- [94] Yasuaki Monnai, Kristian Altmann, Christian Jansen, Hartmut Hillmer, Martin Koch, and Hiroyuki Shinoda. Terahertz beam steering and variable focusing using programmable diffraction gratings. *Optics express*, 21(2):2347–2354, 2013.
- [95] Steffen Schumann, Christian Jansen, Michael Schwerdtfeger, Stefan Busch, Ole Peters, Maik Scheller, and Martin Koch. Spectrum to space transformed fast terahertz imaging. *Optics express*, 20(17):19200–19205, 2012.
- [96] Hou-Tong Chen, Willie J Padilla, Michael J Cich, Abul K Azad, Richard D Averitt, and Antoinette J Taylor. A metamaterial solid-state terahertz phase modulator. *Nature Photonics*, 3(3):148–151, 2009.
- [97] T. Kleine-Ostmann, K. Pierz, G. Hein, P. Dawson, and M. Koch. Audio signal transmission over THz communication channel using semiconductor modulator. *Electronics Letters*, 40(2):1, 2004.
- [98] R. Kersting, G. Strasser, and K. Unterrainer. Terahertz phase modulator. *Electronics Letters*, 36(13):1, 2000.
- [99] Kristian Altmann, Marco Reuter, Katarzyna Garbat, Martin Koch, Roman Dabrowski, and Ingo Dierking. Polymer stabilized liquid crystal phase shifter for terahertz waves. *Optics express*, 21(10):12395–12400, 2013.
- [100] N. Born, M. Scheller, M. Koch, and Jerome V. Moloney. Cavity enhanced terahertz modulation. *Applied Physics Letters*, 104(10):103508, 2014.
- [101] Rafal Wilk, Nico Vieweg, Olaf Kopschinski, and Martin Koch. Liquid crystal based electrically switchable bragg structure for THz waves. *Optics express*, 17(9):7377–7382, 2009.

- [102] T. Kleine-Ostmann, P. Dawson, K. Pierz, G. Hein, and M. Koch. Room-temperature operation of an electrically driven terahertz modulator. *Applied physics letters*, 84(18):3555–3557, 2004.
- [103] Norman Born, Marco Reuter, Martin Koch, and Maik Scheller. High-Q terahertz bandpass filters based on coherently interfering metasurface reflections. *Optics letters*, 38(6):908–910, 2013.
- [104] Norman Born, Ralf Gente, Ibraheem AI Al-Naib, and Martin Koch. Laser beam machined free-standing terahertz metamaterials. *Electronics Letters*, 51(13):1012–1014, 2015.
- [105] Norman Born, Ibraheem Al-Naib, Christian Jansen, Ranjan Singh, Jerome V. Moloney, Maik Scheller, and Martin Koch. Terahertz metamaterials with ultrahigh angular sensitivity. *Advanced Optical Materials*, 3(5):642–645, 2015.
- [106] Stefan F. Busch, Steffen Schumann, Christian Jansen, Maik Scheller, Martin Koch, and Bernd M Fischer. Optically gated tunable terahertz filters. *Applied Physics Letters*, 100(26):261109, 2012.
- [107] M. Reuter, N. Vieweg, B. M. Fischer, M. Mikulicz, M. Koch, K. Garbat, and R. Dąbrowski. Highly birefringent, low-loss liquid crystals for terahertz applications. *APL materials*, 1(1):012107, 2013.
- [108] Christian Jansen, Steffen Wietzke, Victoria Astley, Daniel M Mittleman, and Martin Koch. Mechanically flexible polymeric compound one-dimensional photonic crystals for terahertz frequencies. *Applied Physics Letters*, 96(11):111108, 2010.
- [109] Christian Jansen, Ibraheem AI Al-Naib, Norman Born, and Martin Koch. Terahertz metasurfaces with high q-factors. *Applied Physics Letters*, 98(5):051109, 2011.
- [110] Christian Jördens, Kin Lien Chee, Ibraheem AI Al-Naib, Ioachim Pupeza, Sören Peik, Gerhard Wenke, and Martin Koch. Dielectric fibres for low-loss transmission of millimetre waves and its application in couplers and splitters. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 31(2):214–220, 2010.
- [111] Shaghik Atakaramians, Shahraam Afshar, Heike Ebendorff-Heidepriem, Michael Nagel, Bernd M. Fischer, Derek Abbott, and Tanya M. Monro. THz porous fibers: design, fabrication and experimental characterization. *Optics express*, 17(16):14053–14062, 2009.
- [112] Kristian Nielsen, Henrik K. Rasmussen, Aurèle J. L. Adam, Paul C. M. Planken, Ole Bang, and Peter Uhd Jepsen. Bendable, low-loss topas fibers for the terahertz frequency range. *Optics Express*, 17(10):8592–8601, 2009.
- [113] H. Han, H. Park, M. Cho, and J. Kim. Terahertz pulse propagation in a plastic photonic crystal fiber. *Applied Physics Letters*, 80(15):2634–2636, 2002.

- [114] Rajind Mendis and Daniel M. Mittleman. Comparison of the lowest-order transverse-electric (TE 1) and transverse-magnetic (TEM) modes of the parallel-plate waveguide for terahertz pulse applications. *Optics express*, 17(17):14839–14850, 2009.
- [115] Rajind Mendis and Daniel Grischkowsky. Undistorted guided-wave propagation of subpicosecond terahertz pulses. *Optics letters*, 26(11):846–848, 2001.
- [116] Daru Chen and Haibin Chen. A novel low-loss terahertz waveguide: Polymer tube. *Optics express*, 18(4):3762–3767, 2010.
- [117] Kanglin Wang and Daniel M. Mittleman. Metal wires for terahertz wave guiding. *Nature*, 432(7015):376–379, 2004.
- [118] G. Gallot, S. P. Jamison, R. W. McGowan, and D. Grischkowsky. Terahertz waveguides. *JOSA B*, 17(5):851–863, 2000.
- [119] Claudia Goy, Maik Scheller, Benedikt Scherger, Vincent P. Wallace, and Martin Koch. Terahertz waveguide prism. *Optics express*, 21(16):19292–19301, 2013.
- [120] Ioachim Pupeza, Rafal Wilk, and Martin Koch. Highly accurate optical material parameter determination with THz time-domain spectroscopy. *Optics express*, 15(7):4335–4350, 2007.
- [121] Xi-Cheng Zhang and Jingzhou Xu. *Introduction to THz Wave Photonics*, chapter Generation and Detection of THz Waves, pages 27–48. Springer US, 2010.
- [122] G. Cerullo, S. De Silvestri, and V. Magni. Self-starting kerr-lens mode locking of a Ti: sapphire laser. *Optics letters*, 19(14):1040–1042, 1994.
- [123] David E. Spence, P. N. Kean, and Wilson Sibbett. 60-fsec pulse generation from a self-mode-locked Ti: sapphire laser. *Optics letters*, 16(1):42–44, 1991.
- [124] V. J. Matsas, T. P. Newson, and M. N. Zervas. Self-starting passively mode-locked fibre ring laser exploiting nonlinear polarisation switching. *Optics communications*, 92(1):61–66, 1992.
- [125] V. J. Matsas, T. P. Newson, D. J. Richardson, and David N. Payne. Selfstarting passively mode-locked fibre ring soliton laser exploiting nonlinear polarisation rotation. *Electron. Lett*, 28(15):1391–1393, 1992.
- [126] K. Tamura, E. P. Ippen, H. A. Haus, and L. E. Nelson. 77-fs pulse generation from a stretched-pulse mode-locked all-fiber ring laser. *Optics letters*, 18(13):1080–1082, 1993.
- [127] C. Jördens, T. Schlauch, M. Li, M. R. Hofmann, M. Bieler, and M. Koch. All-semiconductor laser driven terahertz time-domain spectrometer. *Applied Physics B*, 93(2-3):515–520, 2008.

- [128] C. Winnewisser, P. U. Uhd Jepsen, M. Schall, V. Schyja, and H. Helm. Electro-optic detection of THz radiation in LiTaO₃, LiNbO₃ and ZnTe. *Applied Physics Letters*, 70(23):3069–3071, 1997.
- [129] Benjamin Clough, Jianming Dai, and Xi-Cheng Zhang. Laser air photonics: beyond the terahertz gap. *materials today*, 15(1):50–58, 2012.
- [130] K. Ezdi, B. Heinen, C. Jördens, N. Vieweg, N. Krumbholz, R. Wilk, M. Mikulics, and M. Koch. A hybrid time-domain model for pulsed terahertz dipole antennas. *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, 4, 2009.
- [131] N. Vieweg, M. Mikulics, M. Scheller, K. Ezdi, R. Wilk, H.-W. Hübers, and M. Koch. Impact of the contact metallization on the performance of photoconductive THz antennas. *Optics express*, 16(24):19695–19705, 2008.
- [132] Peter Uhd Jepsen, Rune Hylsberg Jacobsen, and S. R. Keiding. Generation and detection of terahertz pulses from biased semiconductor antennas. *JOSA B*, 13(11):2424–2436, 1996.
- [133] Reinhard Lerch. *Elektrische Messtechnik: analoge, digitale und computergestützte Verfahren*. Springer-Verlag, 2010.
- [134] Norman Krumbholz. *Fasergekoppelte Terahertz-Zeitbereichsspektrometer: Entwicklung und Anwendung*. PhD thesis, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2010.
- [135] A. Soltani, T. Probst, S. F. Busch, M. Schwerdtfeger, E. Castro-Camus, and M. Koch. Error from delay drift in terahertz attenuated total reflection spectroscopy. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 35(5):468–477, 2014.
- [136] N. Krumbholz, C. Jansen, M. Scheller, T. Müller-Wirts, S. Lübbecke, R. Holzwarth, R. Scheunemann, R. Wilk, B. Sartorius, H. Roehle, et al. Hand-held terahertz spectrometer for the detection of liquid explosives. In *SPIE Europe Security+ Defence*, pages 748504–748504. International Society for Optics and Photonics, 2009.
- [137] Dominik Stehr, Christopher M. Morris, Christian Schmidt, and Mark S. Sherwin. High-performance fiber-laser-based terahertz spectrometer. *Optics letters*, 35(22):3799–3801, 2010.
- [138] S. Hadjiloucas, G. C. Walker, J. W. Bowen, V. M. Becerra, A. Zafiropoulos, and R. K. H. Galvão. High signal to noise ratio THz spectroscopy with asops and signal processing schemes for mapping and controlling molecular and bulk relaxation processes. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 183, page 012003. IOP Publishing, 2009.
- [139] Albrecht Bartels, Arne Thoma, Christof Janke, Thomas Dekorsy, Andre Dreyhaupt, Stephan Winnerl, and Manfred Helm. High-resolution THz spectrometer with kHz scan rates. *Optics express*, 14(1):430–437, 2006.

- [140] Christof Janke, Michael Först, Michael Nagel, Heinrich Kurz, and Albrecht Bartels. Asynchronous optical sampling for high-speed characterization of integrated resonant terahertz sensors. *Optics letters*, 30(11):1405–1407, 2005.
- [141] Albrecht Bartels, Roland Cerna, Caroline Kistner, Arne Thoma, Florian Hurdert, Christof Janke, and Thomas Dekorsy. Ultrafast time-domain spectroscopy based on high-speed asynchronous optical sampling. *Review of Scientific Instruments*, 78(3):035107, 2007.
- [142] Roman J. B. Dietz, Nico Vieweg, Thomas Puppe, Armin Zach, Björn Globisch, Thorsten Göbel, Patrick Leisching, and Martin Schell. All fiber-coupled THz-tds system with kHz measurement rate based on electronically controlled optical sampling. *Optics letters*, 39(22):6482–6485, 2014.
- [143] Youngchan Kim and Dae-Su Yee. High-speed terahertz time-domain spectroscopy based on electronically controlled optical sampling. *Optics letters*, 35(22):3715–3717, 2010.
- [144] R. Wilk. All fiber THz spectrometer for plastics industry. *Polska Akademia Nauk. Bulletin of the Polish Academy of Sciences*, 59(3):283, 2011.
- [145] Tilman Butz. *Fouriertransformation für Fußgänger*. Springer, 2011.
- [146] Maik Scheller and Martin Koch. Fast and accurate thickness determination of unknown materials using terahertz time domain spectroscopy. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 30(7):762–769, 2009.
- [147] Maik Scheller, Christian Jansen, and Martin Koch. Analyzing sub-100- μm samples with transmission terahertz time domain spectroscopy. *Optics Communications*, 282(7):1304–1306, 2009.
- [148] Lionel Duvallaret, Frédéric Garet, and Jean-Louis Coutaz. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy. *Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of*, 2(3):739–746, 1996.
- [149] Otto Forster. *Analysis 1*. Springer Spektrum, 2013.
- [150] Maik Scheller, Thomas Kinder, Ole Peters, Thomas Müller-Wirts, and Martin Koch. Single sampling point detection of frequency modulated terahertz waves. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 33(1):36–42, 2012.
- [151] Maik Scheller and Martin Koch. Terahertz quasi time domain spectroscopy. *Opt Express*, 17(20):17723–17733, Sep 2009.
- [152] U. Willer, R. Wilk, W. Schippers, S. Böttger, D. Nodop, T. Schossig, W. Schade, M. Mikulics, M. Koch, M. Walther, et al. A novel THz source based on a two-color Nd: LSB microchip-laser and a LT-GaAsSb photomixer. *Applied Physics B*, 87(1):13–16, 2007.
- [153] Masahiko Tani, Osamu Morikawa, Shuji Matsuura, and Masanori Hangyo. Generation of terahertz radiation by photomixing with dual-and multiple-mode lasers. *Semiconductor science and technology*, 20(7):S151, 2005.

- [154] Maik Scheller, Stefan F. Dürschmidt, Matthias Stecher, and Martin Koch. Terahertz quasi-time-domain spectroscopy imaging. *Applied Optics*, 50(13):1884–1888, 2011.
- [155] M. Scheller, M. Stecher, M. Gerhard, and M. Koch. Versatile spectrally shapable multi-mode terahertz system. *Applied Physics B*, 106(1):81–84, 2012.
- [156] J. B. Gunn. Microwave oscillations of current in III-V semiconductors. *Solid State Communications*, 1(4):88–91, 1963.
- [157] B. K. Ridley and T. B. Watkins. The possibility of negative resistance effects in semiconductors. *Proceedings of the Physical Society*, 78(2):293, 1961.
- [158] Arthur John Baden-Fuller. *Microwaves*. Pergamon, 1979.
- [159] Leonhard Stiny. *Aktive elektronische Bauelemente*. Springer Vieweg, 2015.
- [160] Sigfrid Yngvesson. *Microwave Semiconductor Devices*, volume 134. KLuwer Academic Publishers, 1991.
- [161] John S. Boyer, Richard A. James, Rana Munns, Tony A. G. Condon, and John B. Passioura. Osmotic adjustment leads to anomalously low estimates of relative water content in wheat and barley. *Functional Plant Biology*, 35(11):1172–1182, 2008.
- [162] Withawat Withayachumnankul, Bernd M. Fischer, Hungyen Lin, and Derek Abbott. Uncertainty in terahertz time-domain spectroscopy measurement. *JOSA B*, 25(6):1059–1072, 2008.
- [163] W. M. Haynes, editor. *CRC handbook of chemistry and physics*. CRC press, 2012.
- [164] Ronald K. Pearson. *Mining imperfect data: Dealing with contamination and incomplete records*. Siam, 2005.
- [165] Abraham Savitzky and Marcel J. E. Golay. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical chemistry*, 36(8):1627–1639, 1964.
- [166] Li-Cor, Inc., Lincoln, Nebraska. *Using the LI-6400 Portable Photosynthesis System*, 1999.
- [167] Sören Bartels. *Numerik 3x9*, chapter Gewöhnliche Differenzialgleichungen, pages 161–167. Springer, 2016.
- [168] Petr Beckmann and Andre Spizzichino. *The scattering of electromagnetic waves from rough surfaces*. Artech House, Inc., 1987.
- [169] Nicolas Pinel, Christophe Bourlier, and Joseph Saillard. Degree of roughness of rough layers: extensions of the rayleigh roughness criterion and some applications. *Progress In Electromagnetics Research B*, 19:41–63, 2010.

- [170] Thorsten Probst, Arno Rehn, and Martin Koch. Compact and low-cost THz QTDs system. *Optics express*, 23(17):21972–21982, 2015.
- [171] EWR Barlow, L Boersma, and JL Young. Photosynthesis, transpiration, and leaf elongation in corn seedlings at suboptimal soil temperatures. *Agronomy Journal*, 69(1):95–100, 1977.
- [172] F. Janowiak and A. Markowski. Changes in leaf water relations and injuries in maize seedlings induced by different chilling conditions. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 172(1):19–28, 1994.
- [173] J. Kościelniak. Effect of low night temperatures on photosynthetic activity of the maize seedlings (zea mays l.). *Journal of Agronomy and Crop Science*, 171(2):73–81, 1993.
- [174] A. Kockelmann and U. Meyer. Seed production and quality. In A. P. Draycott, editor, *Sugar Beet*, chapter 5, pages 89 – 112. Blackwell Publishing, Oxford, UK, 2006.
- [175] R. A. T. George. *Agricultural Seed Production*, chapter Part 1, pages 1 – 64. CAB International, Wallingford, Oxfordshire, UK, 2011.
- [176] A. F. Kelly. *Seed production of agricultural crops*, chapter 2, pages 13 – 35. Longman Scientific & Technical, Essex, UK, 1988.
- [177] Ralf Gente, Stefan Busch, Eva-Maria Stübling, Lorenz Maximilian Schneider, Christian B. Hirschmann, Jan C. Balzer, and Martin Koch. Quality control of sugar beet seeds with THz time-domain spectroscopy. *Terahertz Science and Technology, IEEE Transactions on*, 2016 (online first).
- [178] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, and B. P. Flannery. Gaussian mixture models and k-means clustering. In *Numerical Recipes: The Art of Scientific Computing*,, pages 842–850. Cambridge University Press, New York, 3rd ed. edition, 2007.
- [179] Fabian Pedregosa, Gaël Varoquaux, Alexandre Gramfort, Vincent Michel, Bertrand Thirion, Olivier Grisel, Mathieu Blondel, Peter Prettenhofer, Ron Weiss, Vincent Dubourg, et al. Scikit-learn: Machine learning in python. *Journal of Machine Learning Research*, 12(Oct):2825–2830, 2011.
- [180] Jay L. Devore and Kenneth N. Berk. *Modern Mathematical Statistics with Applications*, chapter Overview and Descriptive Statistics, pages 1–49. Springer, 2012.

A. Vollständige Langzeit-Messreihen

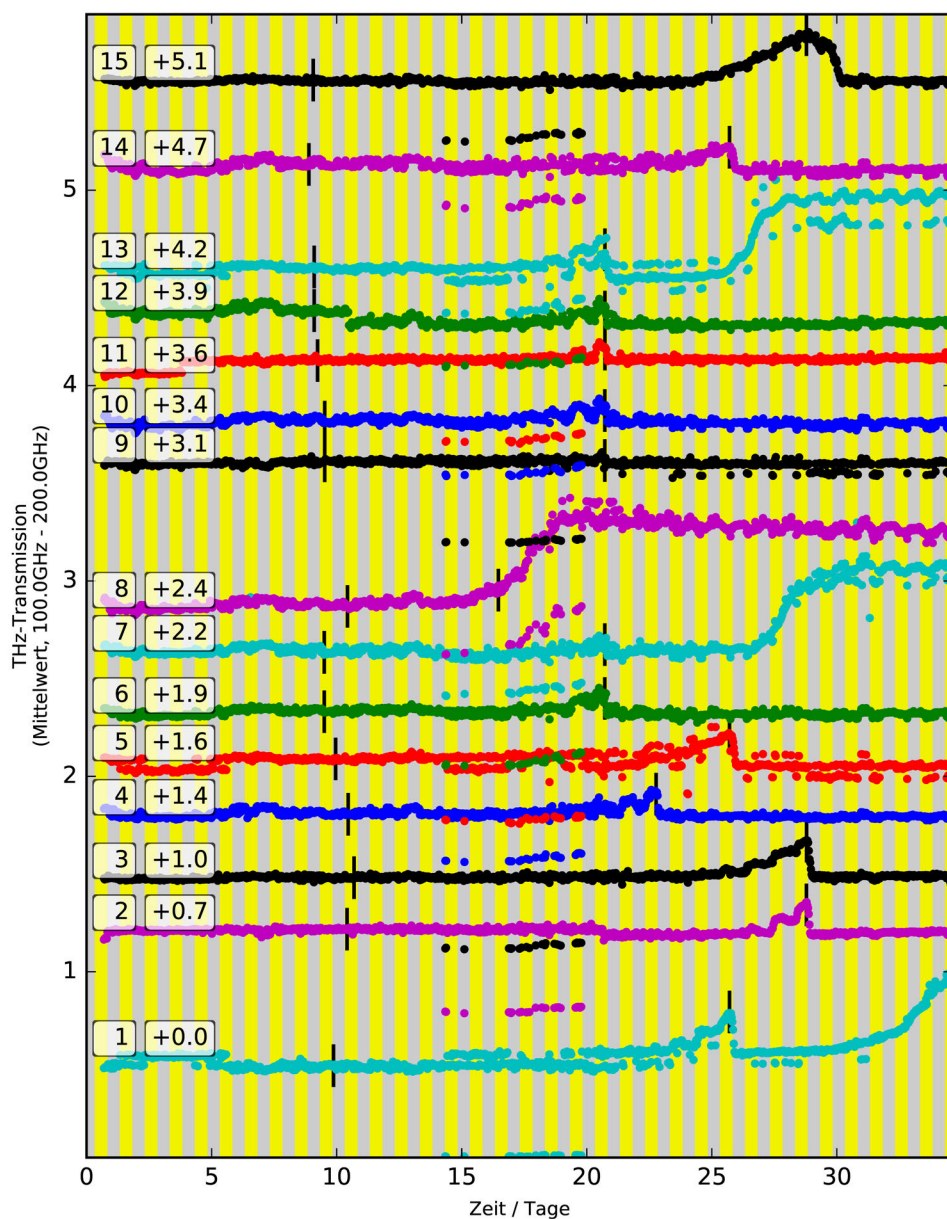


Abbildung A.1.: Roggen (vgl Abb. 3.9)

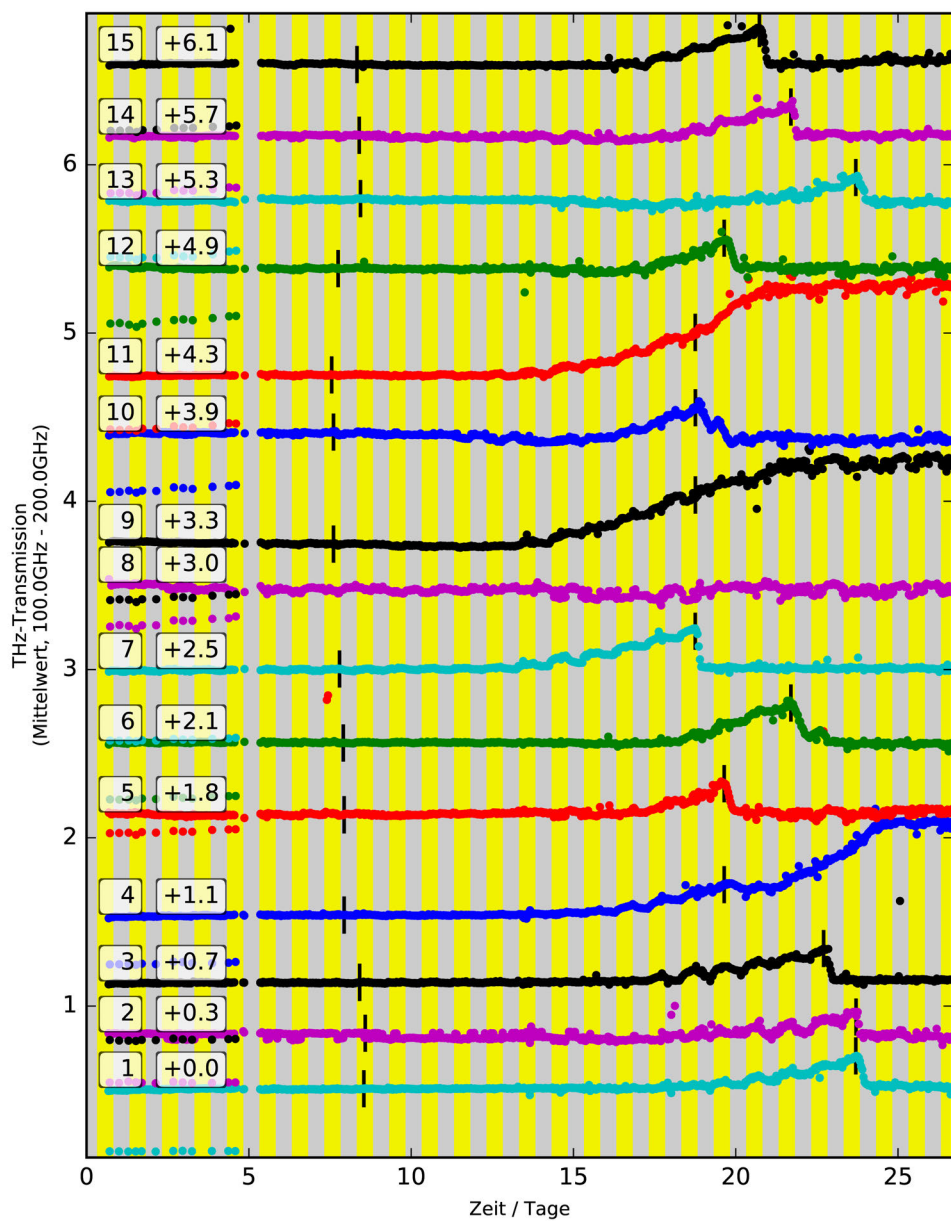


Abbildung A.2.: Roggen (vgl Abb. 3.10)

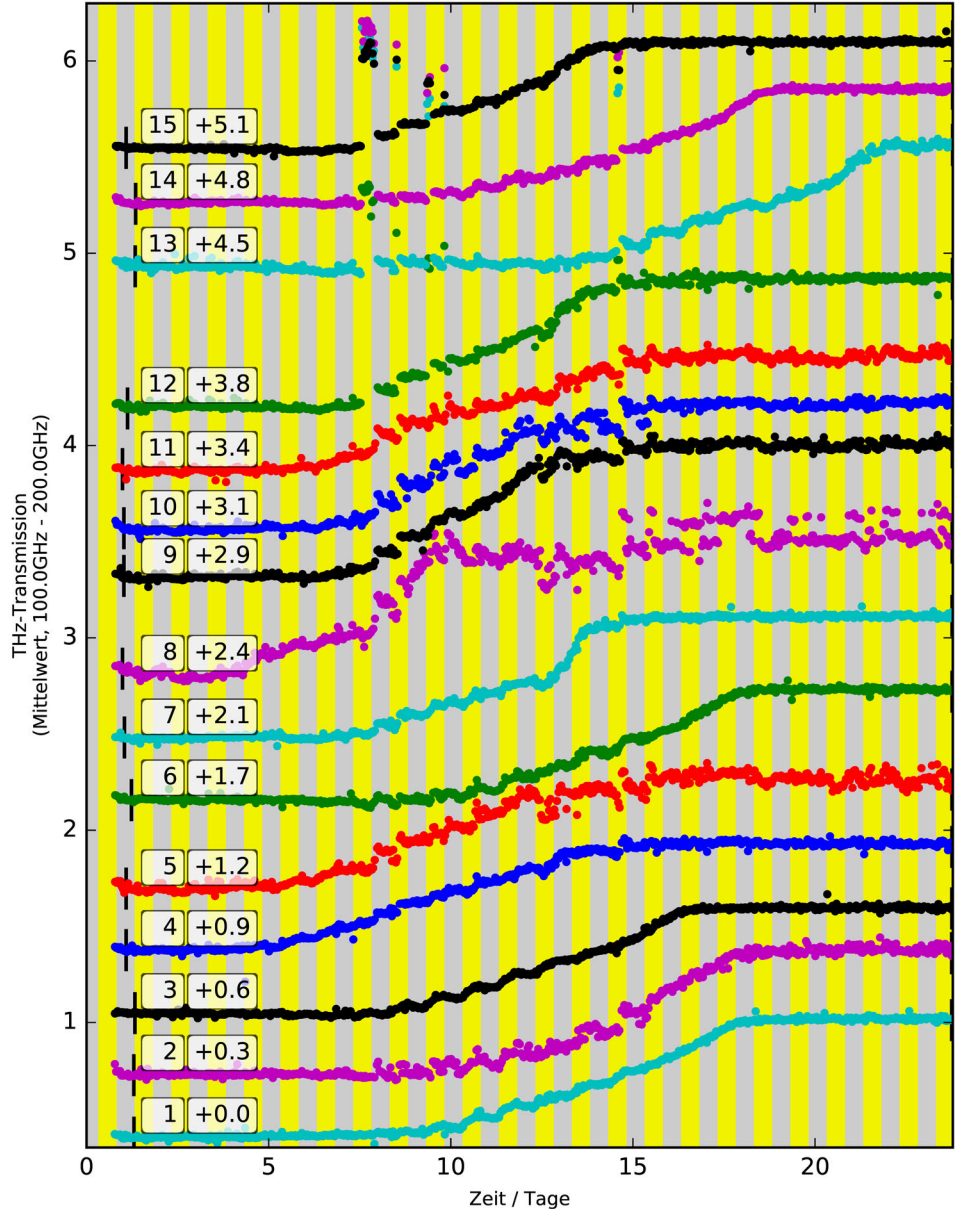


Abbildung A.3.: Roggen (vgl Abb. 3.11)

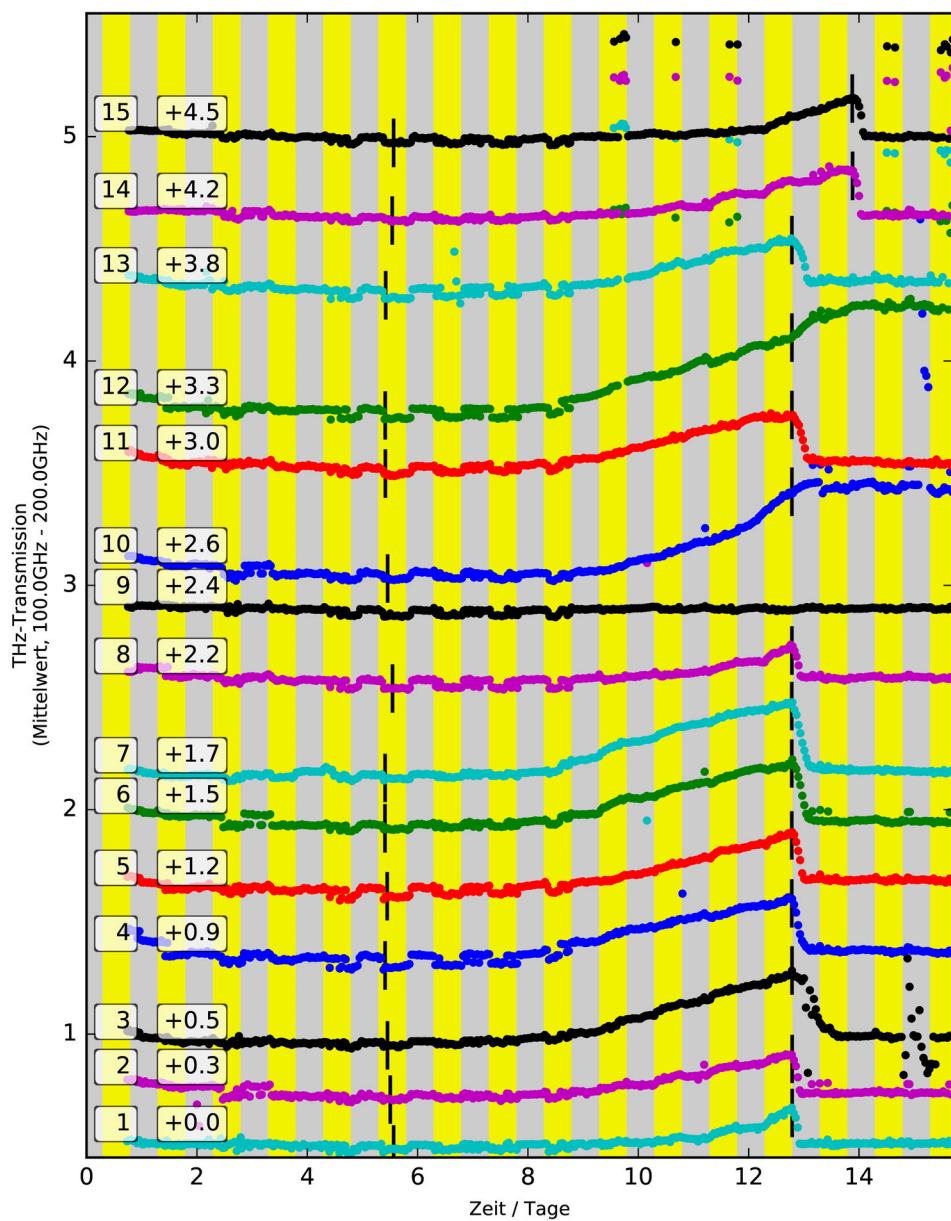


Abbildung A.4.: Hafer (vgl Abb. 3.12)

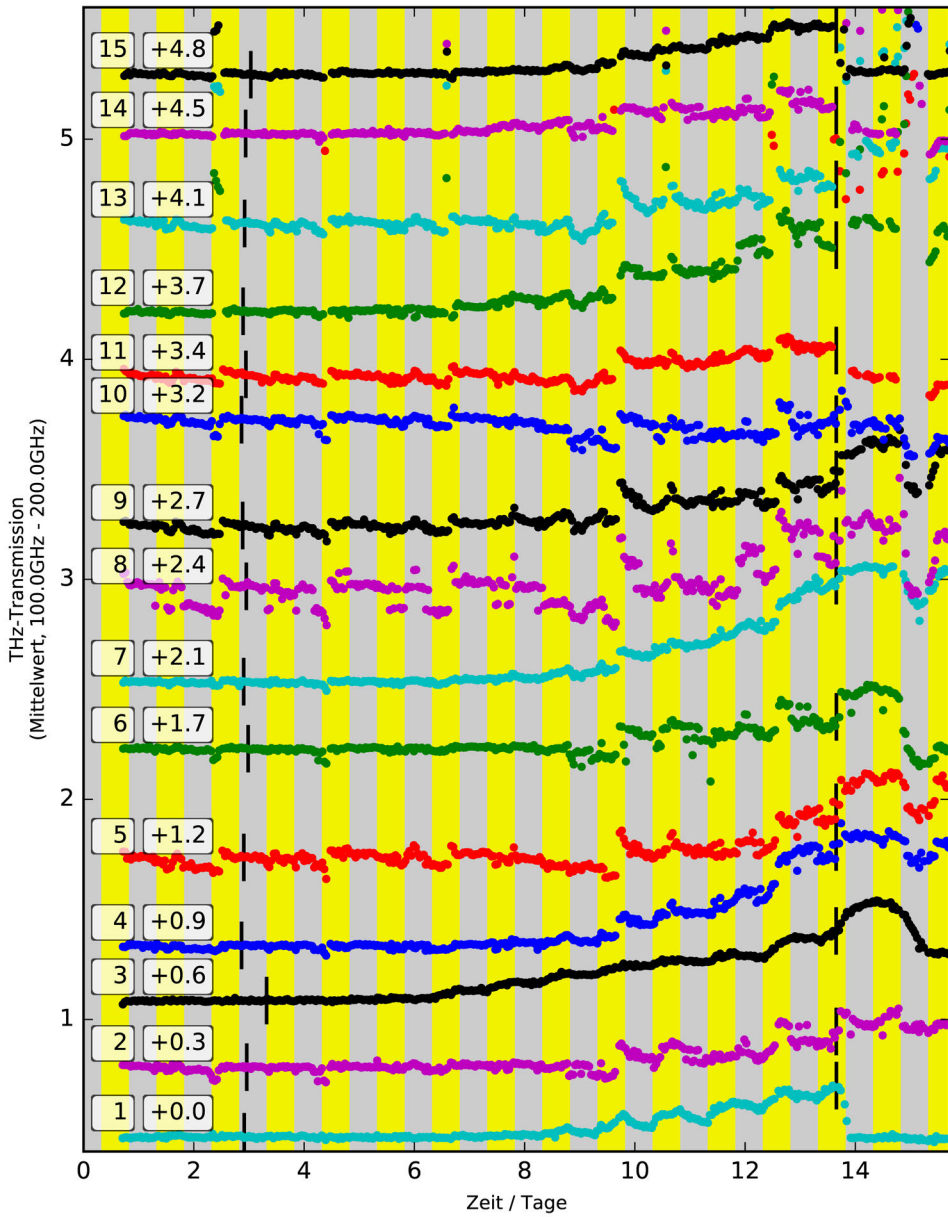


Abbildung A.5.: Hafer (vgl Abb. 3.13)

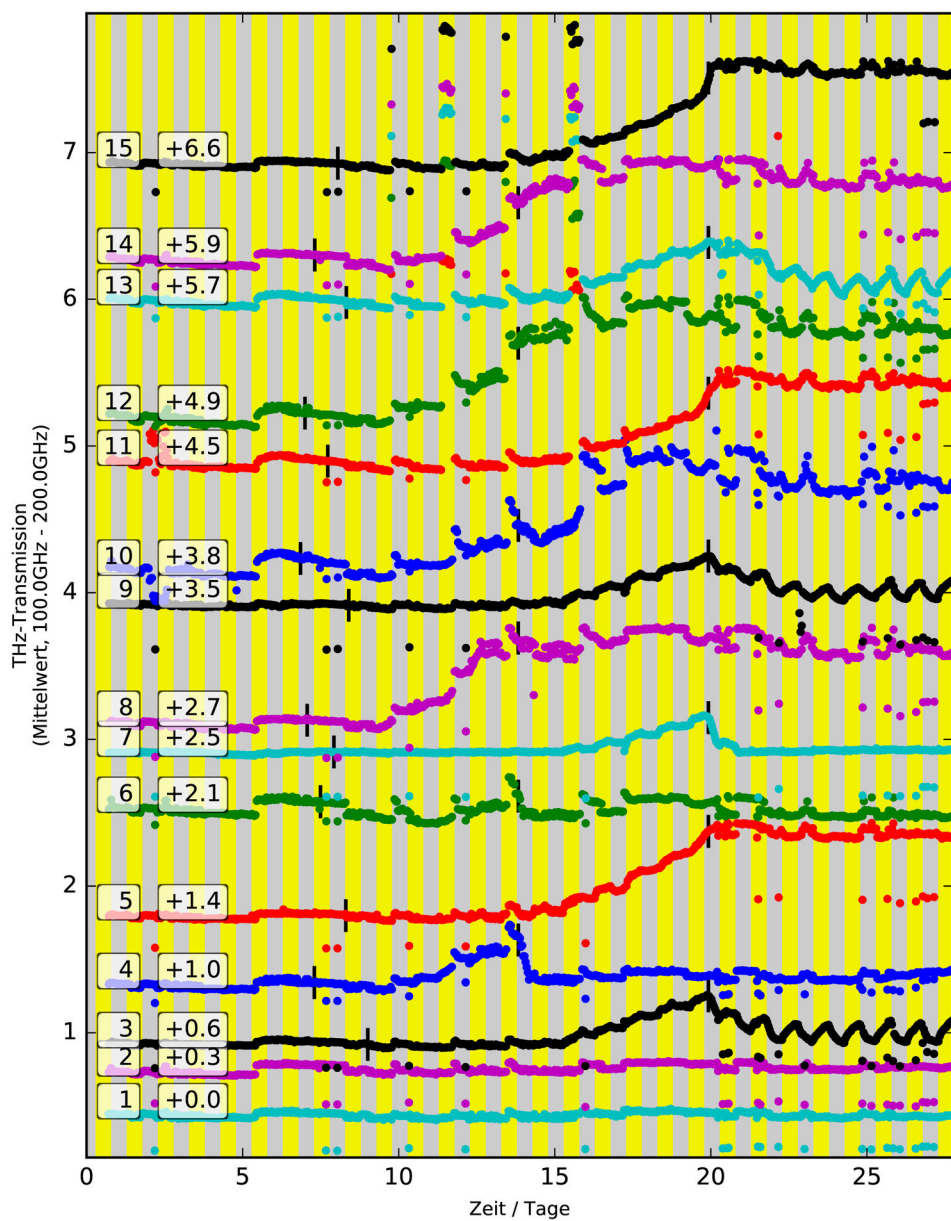


Abbildung A.6.: Weizen (vgl Abb. 3.14)

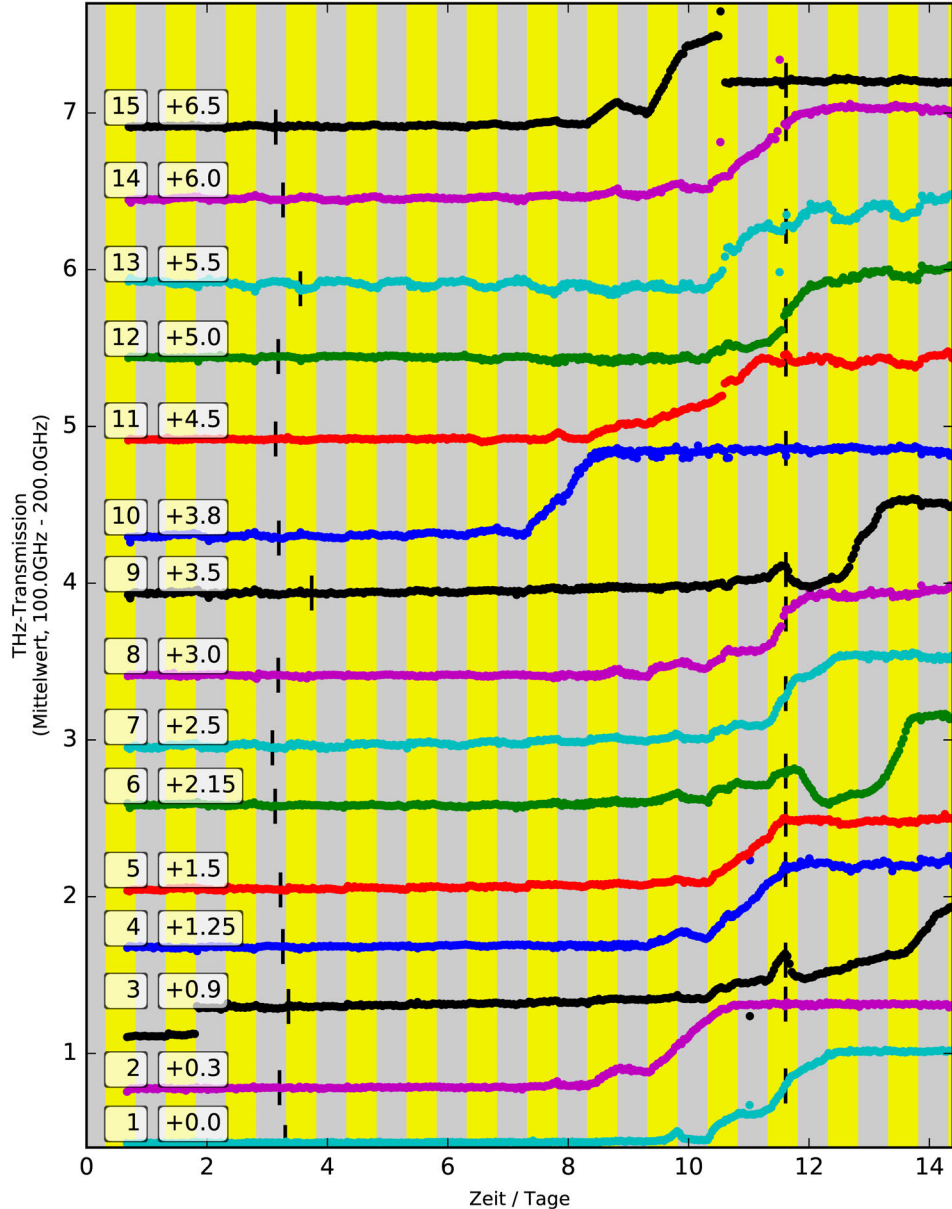


Abbildung A.7.: Mais (vgl Abb. 3.15)

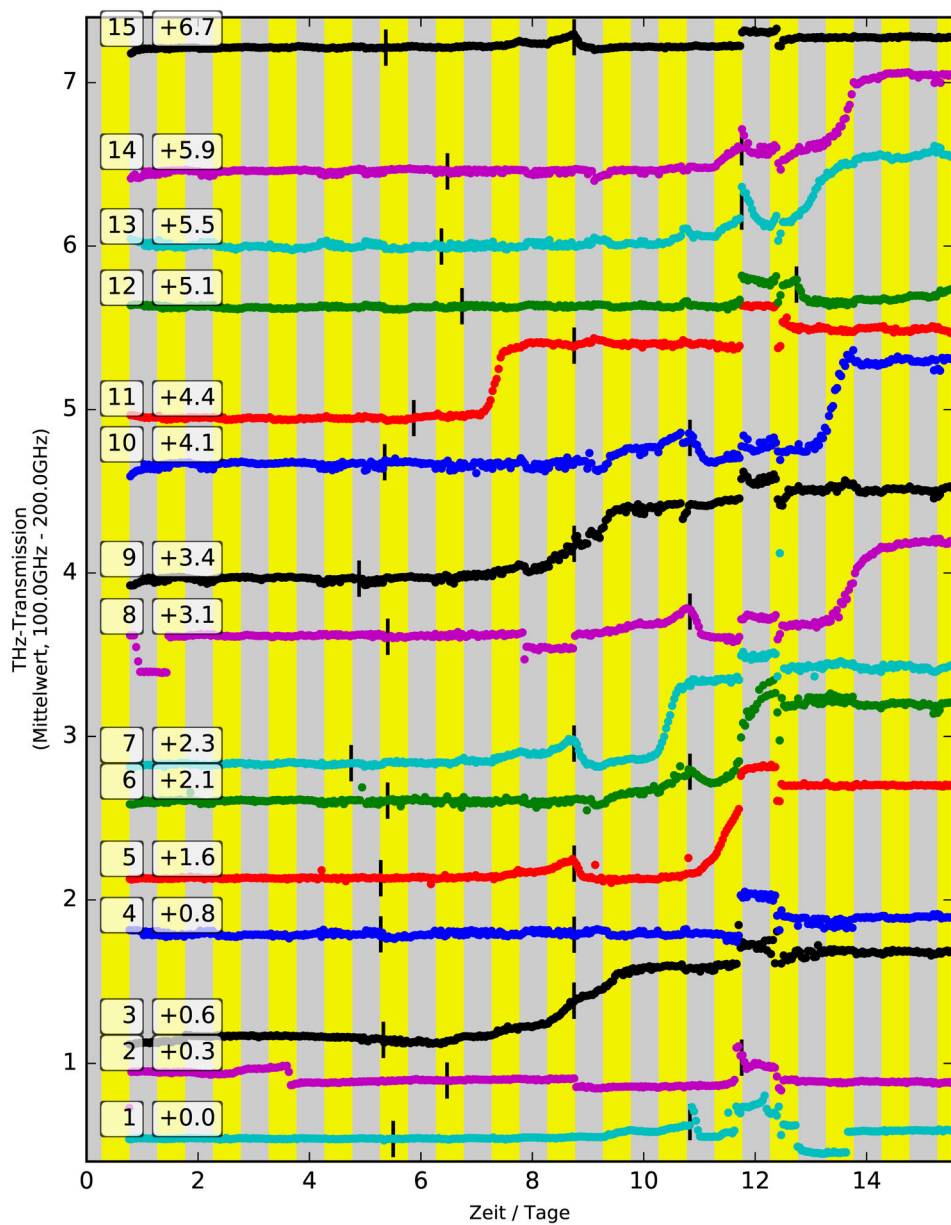


Abbildung A.8.: Mais (vgl Abb. 3.16)

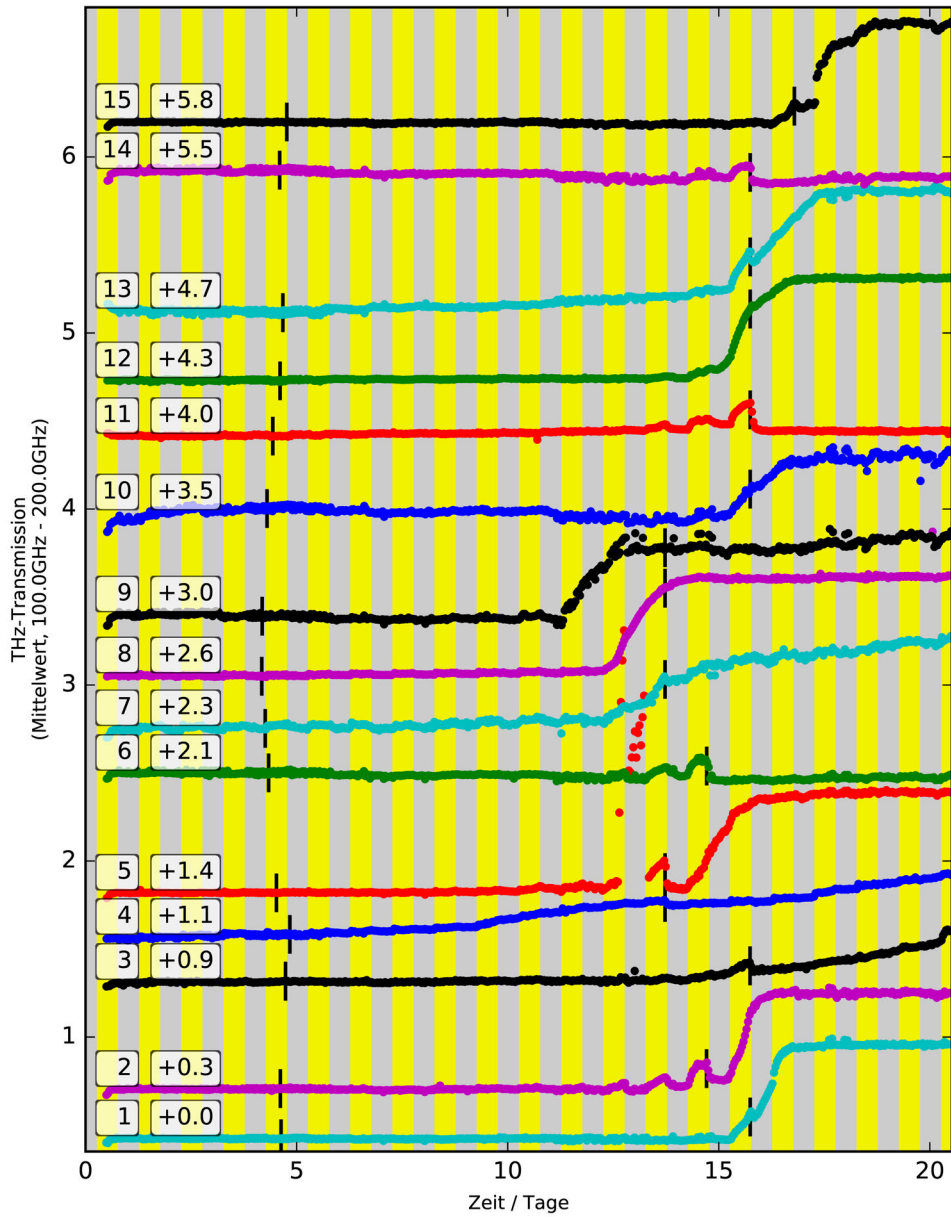


Abbildung A.9.: Mais (vgl Abb. 3.17)

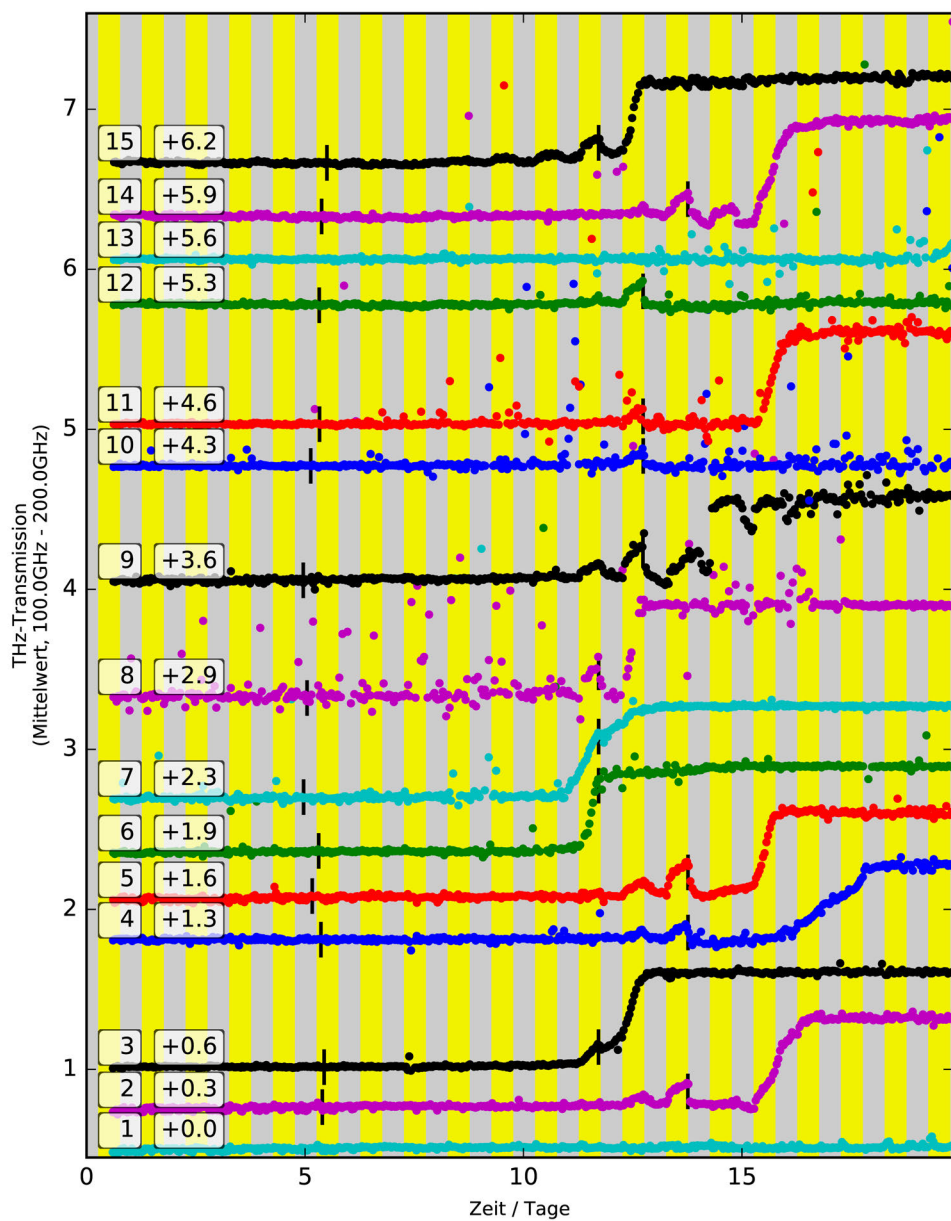


Abbildung A.10.: Mais (vgl Abb. 3.18)

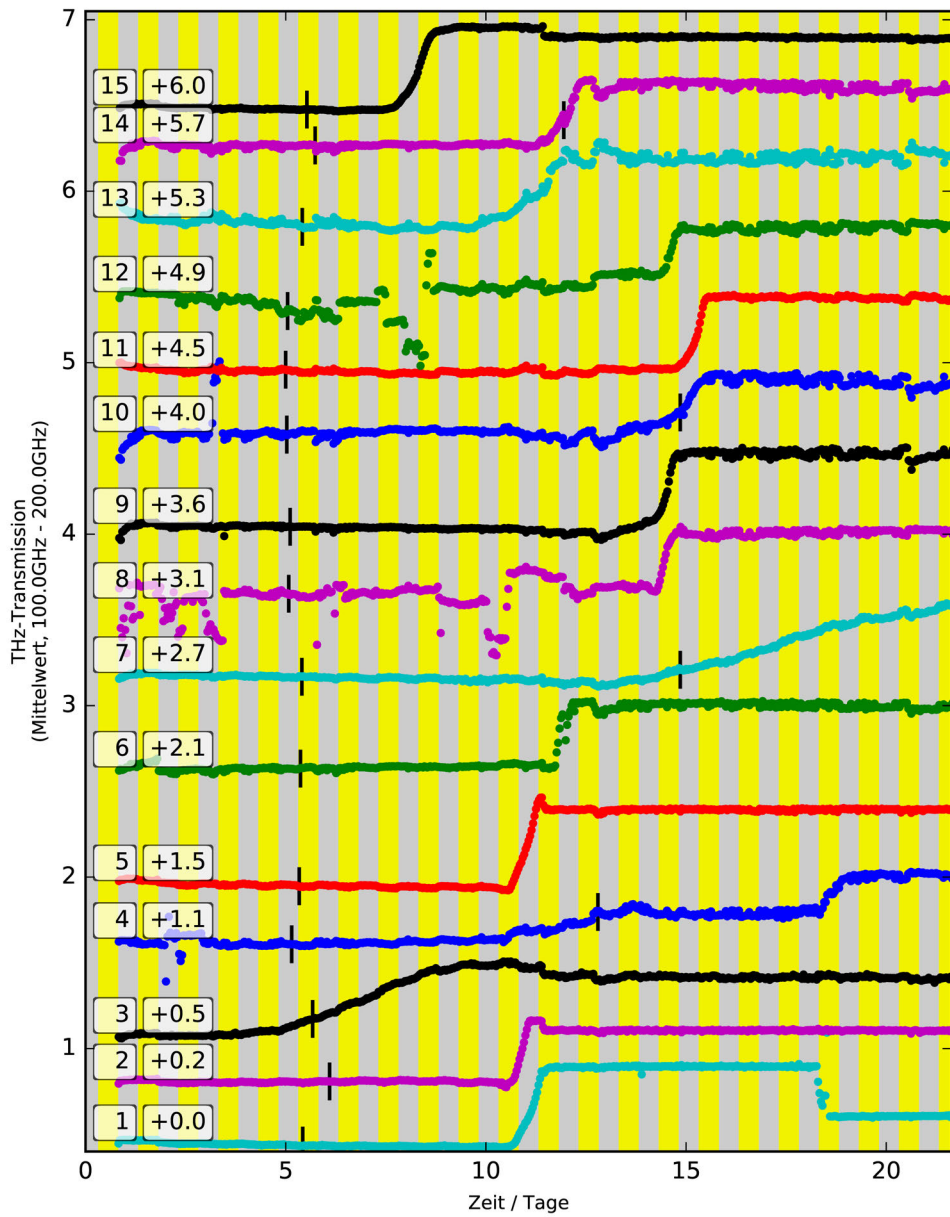


Abbildung A.11.: Soja (vgl Abb. 3.19)

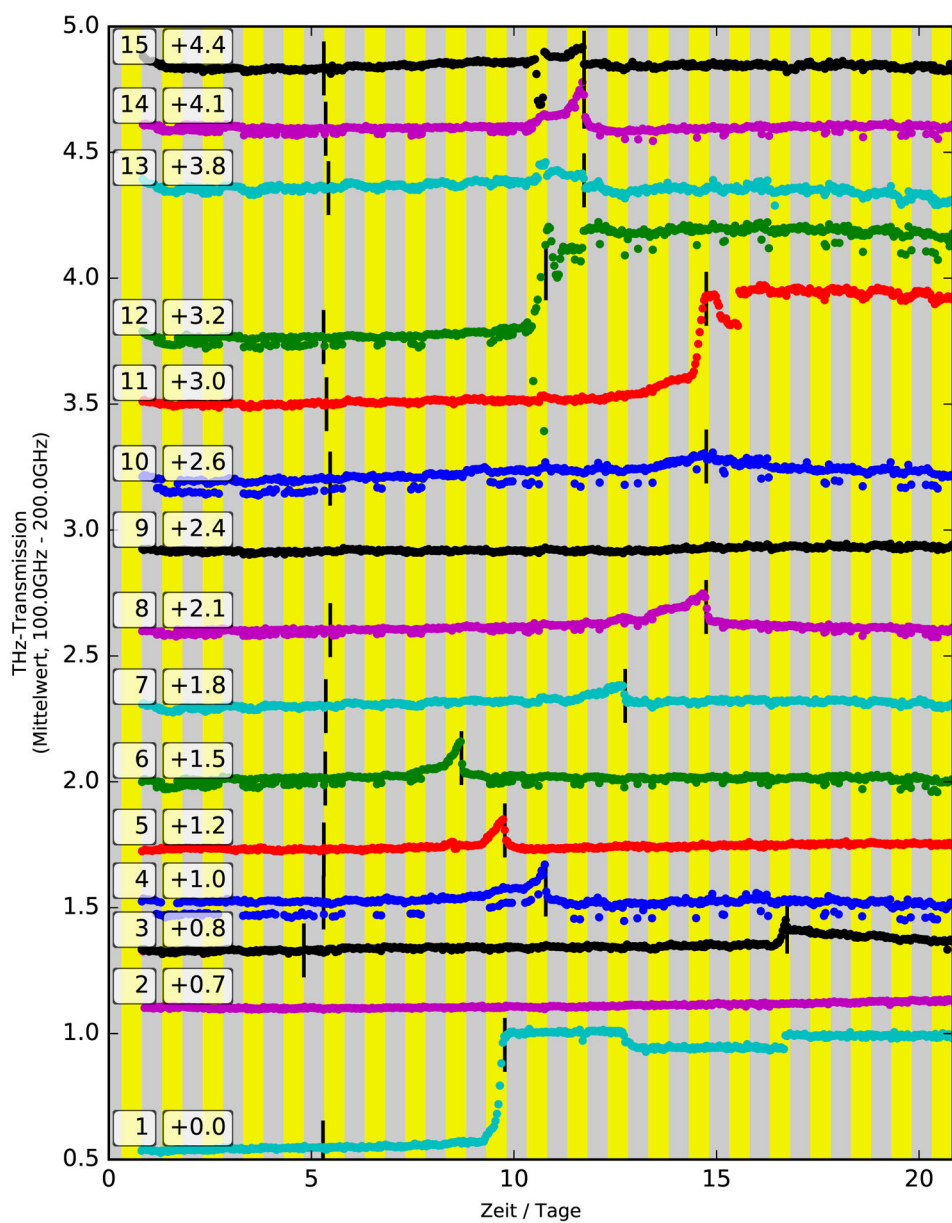


Abbildung A.12.: Soja (vgl Abb. 3.20)

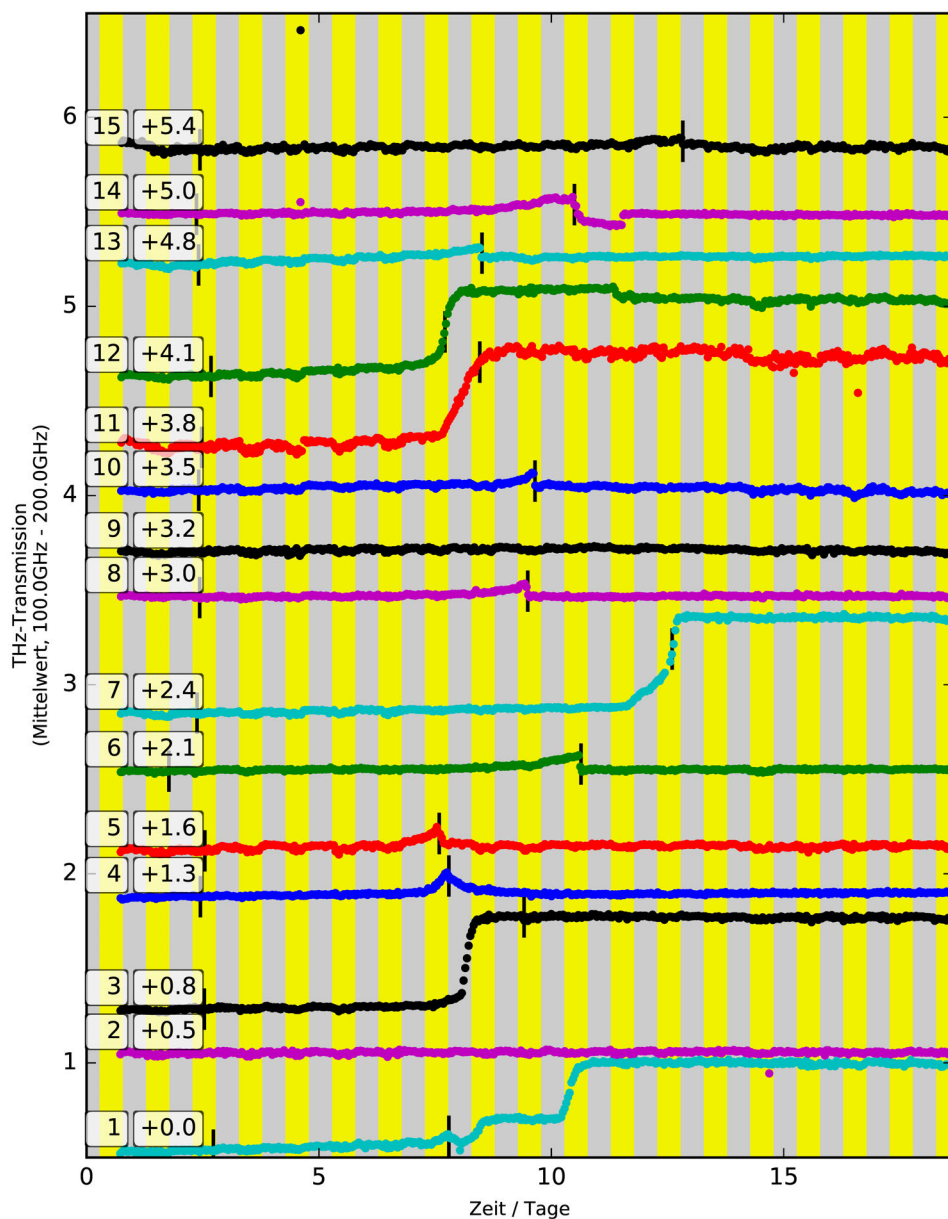


Abbildung A.13.: Soja (vgl Abb. 3.21)

B. Grafische Darstellungsform: Boxplot

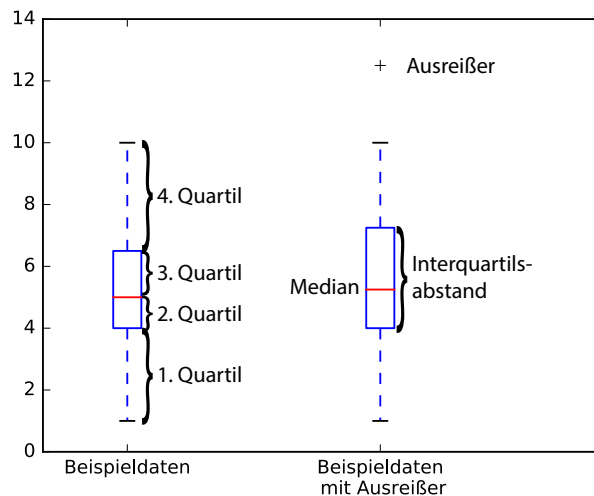


Abbildung B.1.: Darstellung eines Beispieldatensatzes als Boxplot: $\{1; 2; 3; 4; 4; 4,5; 5; 5; 5,5; 6; 6; 7; 8; 9; 10\}$. Als Ausreißer, der gerade eben außerhalb der Grenze des 1,5-fachen Interquartilsabstands außerhalb der Box liegt, wurde der Wert 12,5 hinzugefügt.

Ein Boxplot ist eine grafische Darstellungsform der deskriptiven Statistik, die es ermöglicht, in einer zusammengefassten und dennoch detaillierten Form die Werteverteilung eines Datensatzes zu veranschaulichen. Die Lage- und Streumaße, die zur Erstellung eines Boxplots herangezogen werden, sind nicht von bestimmten Eigenschaften der Daten wie Symmetrie oder Normalverteiltheit abhängig [180]. Als Lageparameter, um den herum der Boxplot aufgebaut wird, wird der Median verwendet. Um diesen herum wird in Form eines Rechtecks die namensgebende „Box“ gezeichnet, deren Ausmaße die beiden an den Median angrenzenden Quartile der betrachteten Werteverteilung umfassen, d.h. oberhalb und unterhalb des Medians liegen jeweils 25% der Werte innerhalb der Box. Die komplette Spannweite der Werte wird durch eine Linie dargestellt, die mit einer T-förmigen Markierung abschließt. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, Ausreißer-Messwerte separat darzustellen. Als Maß zur Identifikation der Ausreißer dient dabei der Interquartilsabstand. Hinter diesem Begriff verbirgt sich der Wertebereich der beiden um den Median angeordneten Quartile, bzw. die Höhe der „Box“. Als Ausreißer werden Werte bezeichnet, die um mehr als das 1,5-fache des Interquartilsabstands außerhalb der Box liegen. Diese Werte werden aus der Darstellung des Wertebereichs herausgenommen und stattdessen mit einer eigenen Markierung in den Plot eingetragen. Auf diese Weise erhält man mit dem eigentlichen Boxplot ein Bild von der Verteilung der Werte, das nicht von Ausreißern beeinträchtigt wird. Gleichzeitig wird aber immer noch der volle Umfang der Daten unverfälscht dargestellt.